Областное государственное автономное
профессиональное образовательное учреждение
«Губкинский горно-политехнический колледж»

Проектирование электрических машин постоянного тока

(методические рекомендации)

Разработал: Канова Людмила Вячеславовна,
заведующий отделением, преподаватель

Губкин
2015

Канова, Л.В. Проектирование электрических машин постоянного тока (методические рекомендации), 2015.

Методические рекомендации состоят из теоретической части, методических указаний по выполнению курсового проекта с приложениями и примера расчета машины постоянного тока.
Методические рекомендации предназначены для студентов специальности 13.02.11 Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям) в рамках курсового проектирования по МДК.01.01. Электрические машины и аппараты.

Рецензент:

Содержание:

Введение	4
1. Общие сведения	7
2. Выбор главных размеров	19
3. Расчет обмотки и пазов якоря	23
4. Расчет воздушного зазора под главными полюсами. Компенсационная обмотка	56
5. Расчет магнитной цепи	66
6. Расчет обмотки возбуждения	72
7. Расчет коммутации	76
8. Расчет добавочных полюсов	80
9. Потери и КПД. Рабочие характеристики	84
10. Тепловой расчет	89
11. Вентиляционный расчет	106
12. Элементы конструкции	110
Пример расчета двигателя постоянного тока	129
Приложение 1. Высота оси вращения для машин серии 2П	157
Приложение 2. Обмоточные провода	158
Приложение 3. Кривые намагничивания сталей	165
Приложение 4. Щетки для электрических машин	172
Приложение 5. Подшипники качения	175
Приложение 6. Высота оси вращения и связанные с ней установочные размеры машины	180
Приложение 7. Требования к оформлению курсового проекта	183
Список использованных источников	192

Введение

Проектирование электрических машин (ЭМ) включает расчёт и конструирование.

Расчёт машины представляет математически неопределённую задачу т.к. число неизвестных, подлежащих определению, превышает число уравнений. Поэтому в процессе расчёта приходится задаваться некоторыми величинами, используя опыт проектирования подобных машин и экспериментальные данные.

В процессе расчёта, как правило, рассматривают несколько вариантов, окончательно принимая наиболее выгодный.

Проектирование ЭМ включает в себя следующие этапы:

1. Составление технического задания. Выясняются основные требования, предъявляемые заказчиком к ЭМ, соответствие техническим условиям или стандартам, если таковые имеются.

2. Предварительный расчёт основных размеров ЭМ и их соответствие техническому заданию.

3. Предварительный расчёт характеристик машины и оценка её нагрева. Анализируются результаты расчётов различных вариантов, и производится выбор наиболее соответствующего выбранному критерию оптимальности.

4. Уточнение конструкции ЭМ исходя из результатов предыдущего этапа. Полученные материалы являются основой для составления эскизного проекта машины.

5. Изготовление и испытание опытных образцов ЭМ.

6. Корректировка расчётов размеров и параметров машины с учётом результатов испытаний и составление технического проекта.

7. Выпуск опытной партии ЭМ и составление соответствующей технической документации.

Исходными данными для проектирования являются следующие данные: полезная мощность $P_н$ Вт; номинальное напряжение $U_н$ В; частота вращения $n_н$ об/мин; способ возбуждения: последовательное, параллельное, постоянные магниты; режим работы: продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный; исполнение: закрытое, защищённое.

Курсовой проект должна содержать: исходные данные для проектирования, данные расчётов и графическую часть. Графическая часть включает в себя общий вид и разрез машины. В качестве приложений курсовой проект должен содержать спецификацию к графической части, а так же может содержать развёрнутую схему обмотки якоря и рабочие характеристики ЭМ.

Расчёт габаритов, параметров и величин, характеризующих машину постоянного тока (МПТ), производится с использованием системы СИ.

Техническое задание на учебное проектирование двигателей постоянного тока содержит следующие данные:

- номинальную мощность $P_н$, кВт
- номинальное напряжение $U_н$, В
- номинальную частоту вращения $n_н$, об/мин
- тип возбуждения – параллельное без стабилизирующей обмотки
- исполнение по степени защиты от внешних воздействий
- исполнение по способу охлаждения
- режим работы - $S1$ продолжительный
- класс изоляции по нагревостойкости - В

Числовые значения величин, необходимых для проектирования двигателя постоянного тока, приведены в таблице. Выбор данных из таблицы осуществляется в соответствии с вариантом. Номер варианта определяется следующим образом:

- предпоследняя цифра варианта определяется по первой букве фамилии

0	0 – К, Ф
1	1 – А, Л, Х
2	2 – Б, М, Ц
3	3 – В, Н, Ч
4	4 – Г, О, Ш
5	5 – Д, П, Щ
6	6 – Е, Р, Э
7	7 – Ж, С, Ю
8	8 – З, Т, Я
9	9 – И, У

- последняя цифра варианта определяется по последней цифре номера студента по поименной книге.

Таблица. Исходные данные для расчета

исполнение по степени защиты и охлаждению	предпоследняя цифра варианта	номинальное напряжение, $U_н$, В	мощность двигателя $P_н$, кВт, и частота вращения $n_н$, об/мин									
			последняя цифра варианта									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
IP22 IC01	0	110	1,1 / 3000	1,1 / 2200	1,1 / 1500	1,5 / 3000	1,5 / 2200	1,5 / 1500	1,1 / 1000	1,1 / 750	1,1 / 600	2,2 / 3000
IP22 IC01	2	110	2,2 / 2200	2,2 / 1500	1,5 / 1000	1,5 / 750	1,5 / 600	3,0 / 3000	3,0 / 2200	3,0 / 1500	2,2 / 1000	2,2 / 750
IP22 IC01	4	220	2,2 / 600	4,0 / 3000	4,0 / 2200	4,0 / 1500	3,0 / 1000	3,0 / 750	3,0 / 600	5,5 / 3000	5,5 / 2200	5,5 / 1500
IP22 IC01	6	220	4,0 / 1000	4,0 / 750	4,0 / 600	7,5 / 3000	7,5 / 2200	7,5 / 1500	5,5 / 1000	5,5 / 750	11 / 3000	11 / 2200
IP22 IC01	8	440	11 / 1500	7,5 / 1000	15 / 3000	15 / 2200	15 / 1500	11 / 1000	11 / 750	7,5 / 600	18,5 / 3000	22 / 2200
IP44 IC0141	1	110	1,1 / 3000	1,1 / 2200	1,1 / 1500	1,1 / 1000	1,1 / 750	1,5 / 3000	1,5 / 2200	1,5 / 1500	1,5 / 1000	1,5 / 750
IP44 IC0141	3	110	2,2 / 3000	2,2 / 2200	2,2 / 1500	2,2 / 1000	2,2 / 750	3,0 / 3000	3,0 / 2200	3,0 / 1500	3,0 / 1000	3,0 / 750
IP44 IC0141	5	220	4,0 / 3000	4,0 / 2200	4,0 / 1500	4,0 / 1000	4,0 / 750	5,5 / 3000	5,5 / 2200	5,5 / 1500	5,5 / 1000	5,5 / 750
IP44 IC0141	7	220	7,5 / 3000	7,5 / 2200	7,5 / 1500	7,5 / 1000	7,5 / 750	11 / 3000	11 / 2200	11 / 1500	11 / 1000	15 / 3000
IP44 IC0141	9	440	15 / 2200	15 / 1500	18,5 / 3000	18,5 / 2200	22 / 3000	22 / 1500	3,0 / 3000	7,5 / 1000	11 / 2200	5,5 / 1500

Примечание: в числителе указана номинальная мощность $P_н$, кВт, в знаменателе – номинальная частота вращения $n_н$, об/мин

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Машины постоянного тока (МПТ) общего назначения выпускают серийно. Создание каждой новой серии представляет собой сложную научно-техническую и экономическую задачу, решение которой ведется на основе глубокого анализа тенденций развития электромашиностроения и прогнозов показателей технического уровня разрабатываемых машин, а также достижений в области проектирования и технологии. В серии должны быть учтены требования международной стандартизации и приняты рациональные принципы увязки мощностей с высотой оси вращения.

Первая общесоюзная серия МПТ была создана в 1956 году - серия П. В этой серии впервые была установлена нормализованная шкала номинальных мощностей и номинальных частот вращения машин. Машины серии П состояли из трех групп конструктивно подобных отрезков серии: машины мощностью от 0,3 до 200 кВт (1—11-й габариты), машины мощностью 200—1400 кВт (12—17-й габариты) и машин мощностью свыше 1400 кВт (18—26-й габариты).

Габарит машины определяется диаметром якоря, который нормализован. Для каждого габарита устанавливают две длины сердечника. Исполнение двигателей единой серии П от 1-го до 11-го габарита по степени защиты соответствует IP22, по способу охлаждения - IC01 или IC05. Возбуждение смешанное. На рис. 1.1 приведена типичная для этой серии конструкция электрической машины.

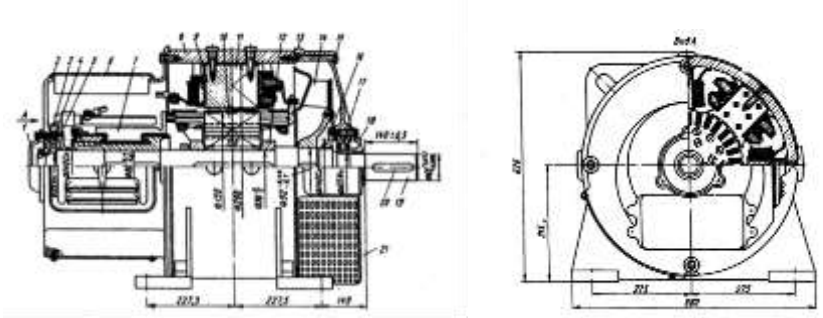


Рис.1.1. Машина постоянного тока типа П-92:

1, 5, 16, 18 – крышки подшипников; *2* – передний щит; *3* – траверса; *4* – шарикоподшипник; *6* – крышка подшипникового щита; *7* – коллектор; *8* – станина; *9* – добавочный полюс; *10* – якорь; *11* – главный полюс; *12* – шайба на валу; *13* – задний щит; *14* – вентилятор; *15* – болт; *17* – роликоподшипник; *19* – вал; *20* – шпонка; *21* – жалюзи

Серия 2П, созданная к 1974 году, спроектирована в полном соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК).

Эта серия машин имеет следующие особенности:

принята единая шкала номинальных высот оси вращения машины;

установочные размеры машины (рис. 1.2) однозначно увязаны с высотой оси вращения, но не определяются мощностью машины;

для каждой высоты оси вращения приняты три значения длины, которым соответствуют три обозначения длины станины; S — для коротких, M — средних и L — длинных машин.

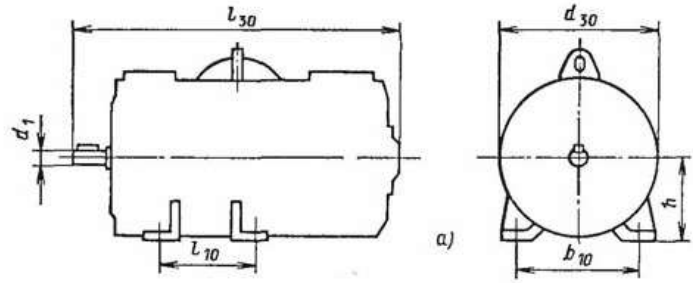


Рис. 1.2. Установочные размеры машины постоянного тока серии 2П

Установочные размеры ЭМ приведены в табл. П6.1. Принятые обозначения размеров: h — высота оси вращения от нижней опорной поверхности лап до оси вала; b_{10} — расстояние между отверстиями под болты в лапах (торцевой вид); l_{10} — расстояние от оси отверстия в лапе машины до упора (заплечника) свободного конца нала; d_1 — диаметр основного свободного конца вала.

Размеры l_1 и d_1 свободного конца вала не связывают с высотой оси вращения, а выбирают в зависимости от наибольшего длительного вращающего момента двигателя согласно табл. 12.1; размеры шпонки и шпоночных канавок связаны с размерами l_1 и d_1.

Двигатели серии 2П имеют следующие степени защиты (по ГОСТ 17494—87):

IP22 — с самовентиляцией (типа 2ПА), независимой вентиляцией от постороннего вентилятора (типа 2ПН);

IP44 — закрытое исполнение с естественным охлаждением (типа 2ПВ) и закрытое исполнение с наружным обдувом от постороннего вентилятора (типа 2ПО).

Формы исполнения двигателей серии 2П в зависимости от габаритов даны в табл. 1.1.

Таблица 1.1. **Формы исполнения двигателей серии 2П**

Формы исполнения	Диапазон габаритов
IM1001, IM1011, IM1031	112,132,160,180,200
IM2101, IM2111, IM2131	180 и 200
IM3601, IM3611, IM3631	112,132,160,180,200

Двигатели серии 2П предназначены для работы как от источников постоянного тока, так и от тиристорных преобразователей. Номинальные напряжения якорной цепи 110, 220, 440, 600 В. Возбуждение независимое, номинальное напряжение возбуждения 110 и 220 В.

Двигатели мощностью до 200 кВт выпускают с номинальными частотами вращения 750, 1000, 1500, 2200, 3000 об/мин. Частота вращения двигателей может регулироваться как изменением напряжения якорной цепи, так и ослаблением поля главных полюсов.

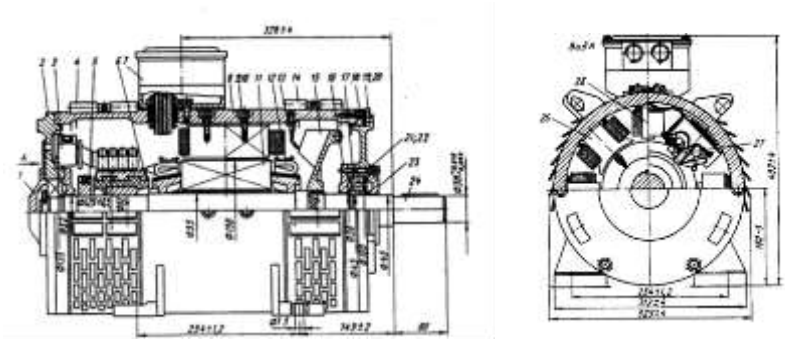


Рис. 1.3. Машина постоянного тока типа 2П-160М:
1,16,23 — крышки подшипников; *2* — щит подшипниковый; *3* — траверса; *4* — лента защитная; *5* — балансировочное колесо; *6* — коллектор; *7* — коробка выводов; *8* — станина; *9* — болт; *10* — шайба; *11* — якорь; *12* — обмотка якоря; *13* — диффузор; *14* — защитная лента; *15* — вентилятор; *17* — шарикоподшипник; *18* — подшипниковый щит; *19* — болт М10; *20* — шайба М10; *21* — болт М6; *22* — шайба М6; *24* — вал; *25* — главный полюс; *26* — дополнительный полюс; *27* — щетки

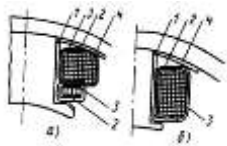
Двигатели серии 2П защищенного исполнения типов 2ПА и 2ПН выполняют с изоляцией класса нагревостойкости В, двигатели закрытого исполнения типов 2ПО и 2ПБ - с изоляцией класса нагревостойкости F.

Конструкция двигателя серии 2П приведена на рис. 1.3.

Корпус станины имеет цилиндрическую форму, изготовляется из стали марки Ст3. К корпусу винтами привернуты главные и дополнительные полюсы с обмотками. Главные полюсы набраны из штампо-

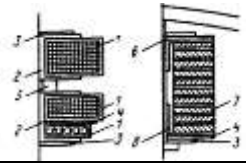
ванных листов электротехнической стали марок 3411, 3413 толщиной 0,5 или 1 мм. Пакеты листов полюсов скрепляют заклепками. Сердечники дополнительных полюсов также выполняют из электротехнической стали 3411 или другой марки толщиной 0,5 мм или 1 мм. При высотах оси вращения до 132 мм сердечники дополнительных полюсов выполняют из полосовой стали марки Ст3. Обмотка главных полюсов - многослойная из медного провода круглого сечения марки ПЭТВ. Обмотка дополнительных полюсов - из медного провода круглого сечения марки ПЭТВ или прямоугольного провода марки ПСД. Собранные катушки главных и дополнительных полюсов пропитывают в нагревостойких лаках, что обеспечивает их монолитность и влагостойкость, уменьшает внутреннее тепловое сопротивление катушки. Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов приведена в табл. 1.2—1.3.

Таблица 1.2. **Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока** (h = 80÷200 мм, напряжение до 600 В)



Позиция	Назначение	Материал			Толщина, мм	Число слоев
		Наименование, марка				
		Класс нагревостойкости				
		B	F	H		
1	Изоляция сердечника (напыление)	Эпоксидная смола			1	—
2	Изоляция катушки	Лакотканеслюдопласт			0,25	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Тоже	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста
4	Рамка	Стеклотекстолит			0,5	1
		СТ	СТЭФ	СТК		

Таблица 1. 3. **Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока** (h = 225÷315 мм, напряжение до 600 В)



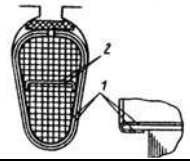
Позиция	Назначение	Материал			Толщина, мм		Число слоев
		Наименование, марка					
		Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости		
		B	F	H	B	F,H	
1	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань			2		1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ			
3	Рамка	Сталь Ст3			1,5		1
		Стеклотекстолит			0,5		1
4		СТ	СТЭФ	СТК			
5	Скоба	Сталь Ст3			8—10		1
6	Изоляция сердечника	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий H	0,16		7,5
7	Прокладка междувитковая	Асбестовая бумага	Фенилоновая бумага 0,2 мм		0,2 × 2		1
8	Изоляция углов	Стеклянная лента ЛЭС					1 вполнахлеста

Пакет якоря набирается из штампованных изолированных лаком листов электротехнической стали марок 2211, 2312, 2411, 3413 и др. толщиной 0,5 мм, напрессовывается непосредственно на вал и закрепляется между двумя нажимными кольцами, являющимися одновременно обмоткодержателями для лобовых частей обмотки якоря.

В пазы сердечника якоря укладывают обмотку. При диаметрах якоря до 200 мм пазы выполняют полузакрытыми овальной формы, зубцы с параллельными стенками. Обмотка якоря в этих случаях - всыпная из эмалированных медных проводников круглого сечения, образующих мягкие секции, которые легко можно уложить в пазы через сравнительно узкие шлицы.

В серийных машинах мощностью более 30 кВт обмотку якоря выполняют из прямоугольных обмоточных проводников в виде формованных жестких секций. Все секции, принадлежащие одной катушке, изолируют общей пазовой изоляцией и укладывают в пазы прямоугольной формы, что обеспечивает хорошее использование площади паза и снижает трудоемкость обмоточных работ. Пазовую изоляцию обмоток с мягкими и жесткими секциями выполняют согласно данным в табл. 1.4—1.6.

Таблица 1.4. **Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока** (пазы овальные полузакрытые, обмотка двухслойная всыпная из круглого эмалированного провода, напряжение до 600В)



Высота оси ращения.	Позиция на рис.	Материал			Толщина, мм	Число слоев	Односторонняя
		Класс нагревостойкости					
		В	F	H			
		Пленкостеклопласт					
80-112	*1* *2*	Изофлекс	Имидофлекс		0,35 0,35	1 1	0,35 0,35
		Пленкостеклопласт					
132-200	*1* *2*	Изофлекс	Имидофлекс		0,25 0,25	2 2	0,25 0,25

Примечание. Прокладку между катушками в лобовых частях обмотки выполняют из изофлекса.

Обмоткодержатели крепят следующим образом: один упирается в уступ на валу, а другой запирается кольцом, насаженным на вал по горячей посадке. Вал из стали марки 45 имеет ступенчатую форму для раздельной посадки на него сердечника якоря, коллектора и вентилятора.

Коллектор состоит из коллекторных пластин, изолированных друг от друга слюдяными пластинами, являющимися межламельной изоля-

цией. При наружном диаметре коллектора до 250 мм коллекторные пластины закрепляют пластмассой, которую впрессовывают во внутреннее отверстие между пластинами и коллекторной втулкой, предназначенной для посадки коллектора на вал. В качестве армирующей пластмассы используют пластмассу АГ-4С или К6.

Концы обмоток якоря впаивают в петушки коллекторных пластин. Траверса щеткодержателей крепится с помощью болтов к подшипниковому щиту со стороны коллектора. Щеткодержатели изолированы от подшипниковых щитов текстолитовыми кольцами. Аксиальную принудительную вентиляцию двигателя осуществляют со стороны привода. Воздух забирается через жалюзи, выполненные в защитной ленте со стороны коллектора, и выбрасывается через отверстия в защитной ленте со стороны привода (выходного вала). Для рационального распределения охлаждающего воздуха над активными частями машины предусмотрен диффузор.

Со стороны коллектора на валу предусмотрено балансировочное кольцо. В подшипниковых щитах со стороны привода и со стороны коллектора установлены шариковые или роликовые подшипники. Концы обмоток якоря и возбуждения выводят к болтам панели, размещенной в коробке выводов.

В конце 70-х годов было начато проектирование и в 1984 г. завершено освоение новой серии 4П двигателей постоянного тока (ДПТ), на базе которых создаются регулируемые электроприводы (ЭП) с высокими динамическими и эксплуатационными показателями для нужд станкостроения и других областей машиностроения. Двигатели серии 4П имеют диапазон регулирования частоты вращения 1:5 при регулировании магнитным потоком двигателя и 1:1000 при тиристорном регулировании напряжения в цепи якоря.

Конструктивно эти двигатели выполнены закрытыми, со степенью защиты IP44, с полностью шихтованным магнитопроводом статора, запрессованным в круглый чугунный или алюминиевый корпус. Способ охлаждения — IC0041 (без вентиляции) или IC0141 с поверхностным охлаждением посредством вентилятора, установленного на валу двигателя. При прямоугольном сечении пакета статора двигатели выполняют без корпуса, способ охлаждения — IC06 или IC05.

По условиям эксплуатации серия 4П выпускается для нормальных условий и для тяжелых условий эксплуатации, соответствующих их работе в механизмах экскаваторов, буровых установок, в оборудовании металлургического производства, в крановом оборудовании и др. Структура серии 4П приведена в табл. 1.7.

Закрытые и обдуваемые двигатели мощностью до 10 кВт с регулированием частоты вращения магнитным потоком составляют почти 2/3 общей потребности народного хозяйства в МПТ.

Таблица 1.5. **Изоляция обмотки якоря машин постоянного тока** (пазы открыты, обмотка из прямоугольного провода, h= 225÷315 мм, напряжение 600 В)

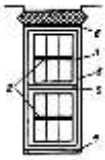
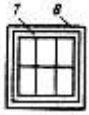
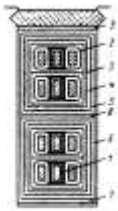
Часть обмотки	Позиция на рис	Материал, марка			Толщина, мм	Число слоев		по ширине	Двусторонняя толщина изоляции по высоте при w_c			
		Класс нагревостойкости				Класс нагревостойкости						
		B	F	H	B F,H	B	F,H		1	2	3	4
Пазовая 	*1*	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий H	0,15 0,16	4,5 оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2	То же	То же	То же	0,15 0 ,16	0—6				0,3	0,6	0,9
	3	Стеклолакоткань ЛСП			0,15	1	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
		Стеклотекстолит										
	4	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
		Допуск на укладку обмотки						0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина или без высоты бандажной канавки)						1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
Лобовая 	*7*	Стеклослюдинитовая лента	Пленка полиамидная марки ПМ 0,05 × 3		0,15	1 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	То же	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)					1	1	1	1	1	1

Таблица 1.6. **Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока** (пазы прямоугольные, открытые, обмотки двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная с жёсткими формированными катушками из провода марки ПСД (Класс нагревостойкости F) и ПСДК (Класс нагревостойкости H), h = 355÷500 мм, напряжение 1000В).

Часть обмотки	Позиция	Материал: Наименование, марка / Класс нагревостойкости		Толщина, мм		Число слоев: Класс нагревостойкости		Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине				по высоте
		F	H	F	H	F	H	2	3	4	5	
Пазовая 	1	Стеклянная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,02	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Бумага фенилоновая	—	0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	3	Полиимидная пленка	ПМ	0,05		3 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	4	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	5	Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	6	Бумага фенилоновая		0,2		1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	7	Стеклостеклотолит	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	8	То же	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	9	То же	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
		Допуск на укладку	—	—		—		0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина)		—		—		2,1	2,1	2,3	2,3	5,8

продолжение табл.1.6

Лобовая	*10*	Стеклянная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	11	Бумага фенилоновая		0,5		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	12	Полиимидная пленка ПМ		0,05		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	13	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	14	Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)		—	—			1,2	1,2	1,4	1,4	1,5

Для повышения технологичности конструкции двигателей серии 4П и использования в их производстве технологического оборудования, созданного под серию 4А асинхронных двигателей (АД), магнитопровод статора этих машин унифицирован с пакетом статора асинхронных машин (АМ). При такой конструкции магнитопровода статора машин серии 4П обмотка возбуждения укладывается в два паза в пределах полюсной дуги основного потока, а во всех остальных пазах равномерно располагается компенсационная обмотка. Распределение обмоток возбуждения и компенсационной обмотки в пазах магнитопровода статора позволяет обеспечить полную компенсацию реакции якоря не только в режимах номинальной нагрузки, но и при больших кратностях перегрузки по току якоря.

Распределение обмоток по пазам статора одновременно улучшает теплоотдачу обмоток, позволяет увеличить плотность тока в обмотках возбуждения, компенсационной и добавочных полюсов и довести их до уровней, установленных для статорных обмоток АМ. При применении шихтованного магнитопровода статора МПТ уменьшается магнитная несимметрия и повышается коммутационная надежность двигателей в стационарных и динамических режимах, улучшаются динамические показатели машины при питании от тиристорных преобразователей напряжения.

Эти двигатели допускают работу без включения в цепь якоря дополнительного сглаживающего реактора. При номинальной мощности допустима пульсация тока до 15%, а при увеличении коэффициента пульсации до 45% мощность двигателя должна быть снижена на 10%.

Таблица 1.7. **Структура двигателей серии 4П**

Исполнение	Тип	Высота оси вращения, мм	Номинальный вращающий момент, Н-м	Способ охлаждения	Степень защиты
Закрытые обдуваемые с нормальным регулированием	4ПО	80	2,3	IC0141	IP44
			3,5		
			4,7		
		100	5,6		
			7,1		
			9,5		
		112	14		
			19		
		132	25		
			35		
		160	47		
Закрытые с естественным охлаждением	4ПБ	100	1,2	IC0041	IP44
			1,6		
			2,4		
		112	7,1		
			9,5		
		132	14		
			19		
		160	25	IC0041	
			35		
Широкорегулируемые с принудительной вентиляцией	4ПФ	112	53	IC05, IC06	IP23
			71		
		132	95		
			118		
			140		
		160	190		
			236		
			280		
			355		
			475		
		200	560		
			710		
		225	850		
			1000		
			1250		
		250	1500		
		280	1700	IC06	
			2120		

продолжение табл.1.7

Крупные двигатели для тяжелых условий эксплуатации		355	3000		IP23
			3750		
			4750		
		450	6000		
			9500		
			15000		

На рис. 1.4 показана конструкция ДПТ типа 4ПО, в которой детали и узлы максимально унифицированы с конструкциями АМ. Приняты одинаковыми внешние диаметры пакетов стали статоров и длины пакетов в обеих конструкциях. Подшипниковые щиты на стороне, противоположной коллектору, станины, коробки выводов, вентиляционные и подшипниковые узлы, используемые в конструкциях серии 4А, могут быть применены в двигателе серии 4П. Поэтому операции штамповки листов, сборки пакетов статора и ротора, запрессовки их в станину и на вал осуществляются на оборудовании, предназначенном для производства АД.

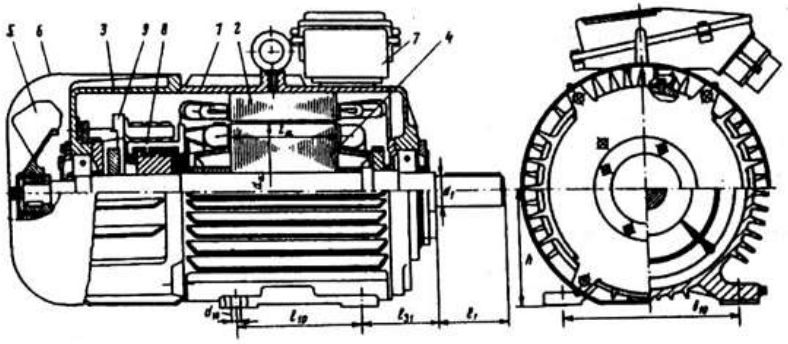


Рис. 11.4. Машина постоянного тока серии 4П:
1 — корпус; *2* — магнитопровод статора; *3* — щит подшипниковый передний; *4* — сердечник якоря; *6* - кожух, *7* – коробка выводов; *8* — коллектор; *9* — токосъемное устройство

Воздушный зазор в рассматриваемых конструкциях выполняется равномерным, без увеличения его под краями главных полюсов. Исполнение двигателя по степени защиты IP44 повышает надежность этих двигателей в эксплуатации. Конструкция изоляции обмоток якоря и статора двигателей серии 4П соответствует изоляции АМ серии 4А и МПТ серии 2П. Класс нагревостойкости изоляции обмоток: F — для магнитной системы и Н — для якоря.

Сравнение степени использования объема ДПТ серии 4П и АД серии 4А показывает, что мощность ДПТ унифицированной конструкции

равна приблизительно 2/3 номинальной мощности АД серии 4А при той же высоте оси вращения. Однако по сравнению с двигателями серии 2П достигнуто значительное снижение расхода активных материалов на единицу мощности. Например, в диапазоне мощностей от 15 кВт до 20 кВт расход обмоточной меди в двигателях новой серии на 20÷30 % меньше, чем в двигателях серии 2П.

2. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Связь между главными размерами машины и электромагнитной мощностью определяется «машинной постоянной» (2.1)

$$c_A = \frac{D^2 l_\delta n}{P'} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{об} A B_\delta}, \qquad (2.1)$$

где D — диаметр якоря МПТ, м;
l_δ — расчетная длина воздушного зазора, м;
n – частота вращения, об/мин;
P' - расчетная мощность, Вт;
A – линейная нагрузка, А/м;
B_δ – индукция в воздушном зазоре, Тл;
$\alpha_\delta, k_B, k_{об}$ – коэффициенты.

По (2.1) можно рассчитать только произведение $D^2 l_\delta$, а для определения главных размеров D и l_δ необходимо предварительно задаться либо отношением $\lambda = l_\delta/\tau$, либо одним из размеров.

МПТ современных серий имеют единую шкалу высот оси вращения (приложение 1). При заданной высоте оси вращения h внешний диаметр корпуса машины постоянного тока не может превышать размер $2h$. Обычно этот диаметр должен быть не более

$$D_н = 2h - (8 \div 10) \cdot 10^{-3}, \quad (2.2)$$

а для четырехполюсных машин

$$D \approx h. \quad (2.3)$$

По данным многих типов и конструкций МПТ относительная радиальная высота магнитной системы $(D_н - D)/D = \mu$ является функцией числа полюсов. Область значений этой функции для различных чисел полюсов приведена на рис. 2.1. Пользуясь (2.2) или (2.3), а также рис. 2.1, можно определить предварительное значение диаметра якоря. Зна-

чение D необходимо уточнить после составления эскиза магнитной системы и межполюсного окна. Далее по (2.1) и уточненному значению D устанавливают расчетную длину якоря l_δ.

Традиционный способ определения главных размеров машины через отношение длины якоря к его диаметру более удобен. На рис. 2.2 приведены зависимости λ от диаметра якоря для МПТ серий 4П, 2П, П и ПН, полученные путем расчета указанного показателя реальных машин. При выборе отношения λ необходимо иметь в виду, что с увеличением длины машины уменьшается относительная длина лобовых частей, возрастает КПД, снижается момент инерции якоря, но при этом ухудшаются условия охлаждения и коммутации машины. Поэтому выбор оптимальных главных размеров и отношения λ возможен только путем сравнения нескольких вариантов машины.

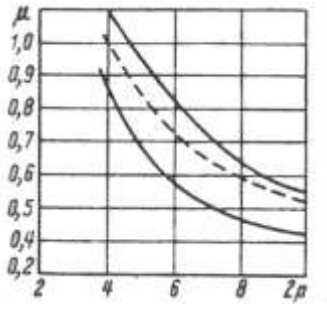


Рис. 2.1. К определению отношения внешнего диаметра якоря к внутреннему диаметру

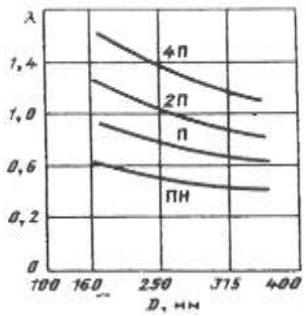


Рис. 2.2. Зависимость λ от диаметра якоря для машин различных серий

Электромагнитная мощность. В (2.1) в качестве расчетной принята электромагнитная мощность P'. Однако истинное значение электромагнитной мощности можно определить только после полного расчета ЭМ — на этапе расчета ее характеристик. Поэтому мощность P' определяют по номинальной (заданной) мощности $P_н$ и предварительно принятому значению КПД.

Зависимость КПД от номинальной мощности для машин общего назначения приведена на рис. 2.3.

Для генераторов расчетная мощность принимается равной:

$$P' = k_г P_н, \qquad (2.4)$$

для двигателей

$$P' = k_д P_н / \eta_н, \qquad (2.5)$$

Значения коэффициентов $k_г$ и $k_д$ приведены в табл. 2.1, там же даны значения коэффициента $k_в$, определяющего отношения тока возбуждения к току якоря.

Для ЭМ общего назначения можно определить электромагнитную мощность по формуле

$$P' = P_н \frac{1+\eta_н}{2\eta_н}, \qquad (2.6)$$

где $\eta_н$ — КПД (рис. 2.3).

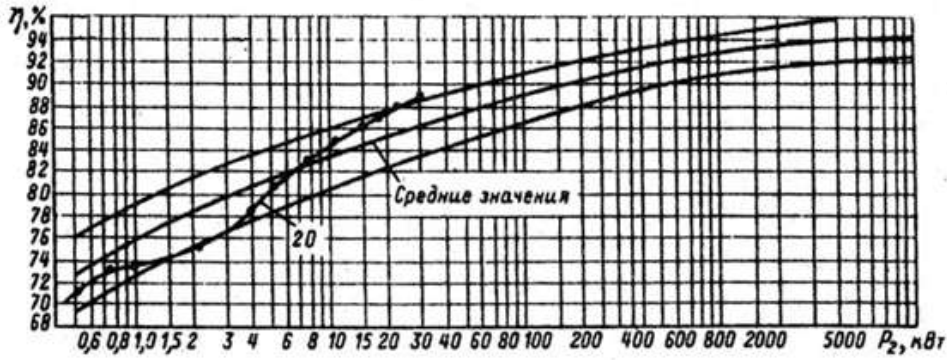


Рис. 2.3. Зависимость КПД машин постоянного тока от мощности машины

Таблица 2.1. **Значения коэффициентов $k_г$, $k_д$, $k_в$**

Мощность машины, кВт	$k_г$	$k_д$	$k_в$
Менее 1	1,4-1,15	0,65-0,85	0,2-0,08
1—10	1,2-1,1	0,82-0,95	0,1-0,025
10—100	1,15-1,06	0,85-0,97	0,035-0,02
100—1000	1,06-1,03	0,93-0,98	0,02-005

.

Выбор коэффициента полюсного перекрытия. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_δ, как следует из (2.1), оказывает влияние на степень использования машины: с увеличением α_δ возрастает использование машины. Однако при чрезмерном увеличении α_δ уменьшается ширина межполюсного окна $(\tau - b_p)$, возрастает поток рассеяния главных полюсов, увеличивается проникновение поля главных полюсов в зону коммутации, уменьшается коммутационная надежность машины.

Для машин общего назначения с добавочными полюсами значение α_δ устанавливается в пределах 0,55÷0,72, без добавочных полю сов α_δ = 0,6÷0,85.

На рис. 2.4 приведены зоны предельных значений α_δ для машин общего назначения при числе полюсов $2p \geq 4$.

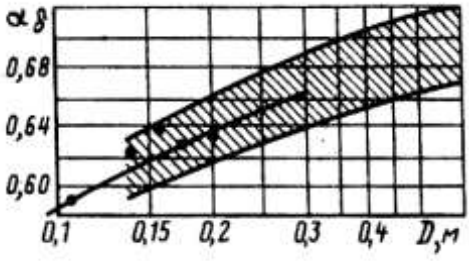


Рис. 2.4. Зависимость $\alpha_\delta = f(D)$

Выбор электромагнитных нагрузок. Согласно (2.1) увеличение электромагнитных нагрузок A и B_δ приводит к улучшению использования объема якоря. Однако с ростом линейной нагрузки A увеличивается нагрев якоря и машины, ухудшается коммутация, с ростом B_δ насыщаются отдельные участки магнитной цепи.

Таким образом, оптимальные значения электромагнитных нагрузок невозможно выбрать на начальном этапе расчета ЭМ. Этот выбор, как правило, основывается на данных, полученных в результате анализа ранее разработанных серий МПТ или путем расчета и сравнения ряда вариантов.

Рекомендуемые значения A и B_δ для машин общего назначения приведены на рис. 2.5 и 2.6. При выборе линейных нагрузок необходимо учитывать, что для хорошо охлаждаемых машин можно выбрать более высокие значения линейных нагрузок; для тихоходных машин, работающих, с перегрузками и частными реверсами, необходимо принимать уменьшенные значения линейных нагрузок. Выбранные значения электромагнитных нагрузок обычно корректируются после расчета ряда вариантов выбора главных размеров, геометрии зубцовой зоны и обмоток.

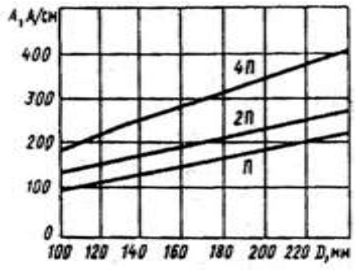


Рис. 2.5. Зависимость линейной нагрузки от диаметра якоря

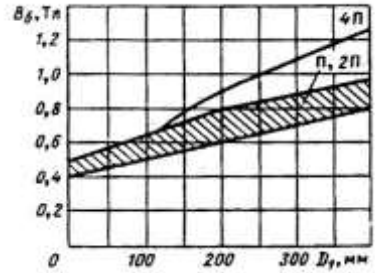


Рис. 2.6. Зависимость индукции в воздушном зазоре от диамет ра якоря

3. РАСЧЕТ ОБМОТКИ И ПАЗОВ ЯКОРЯ

В современных ЭМ наибольшее распространение получили цилиндрические разноименнополюсные (барабанные) обмотки. Проводники таких обмоток располагаются вдоль воздушного зазора машины и не охватывают магнитопровода статора и ротора. Другие типы обмоток встречаются только в некоторых специальных типах ЭМ.

Обмотки бывают сосредоточенными или распределенными. В сосредоточенных обмотках витки, образующие полюс, объединены в одну, как правило, многовитковую катушку, которая насаживается на ферромагнитный сердечник. Полюс, образованный катушкой и сердечником, называют явно выраженным. Обмотки возбуждения почти всех МПТ выполняют сосредоточенными.

Распределенные обмотки состоят из катушек с относительно небольшим числом витков каждая (в машинах большой мощности — до одного-двух витков в катушке). Катушки размещают равномерно по всей длине окружности воздушного зазора в пазах якоря.

Катушки распределенной обмотки (рис. 3.1) наматывают обмоточным проводом. Прямолинейные части витков, располагающиеся в пазах магнитопровода, называют пазовыми частями; криволинейные, которые соединяют пазовые части между собой, — лобовыми частями витка. Аналогичные названия — пазовые и лобовые части — имеют соответствующие части катушки. Участки изгибов лобовых частей называют головками катушек, начала и конец обмоточного провода, которым намотана катушка, — выводными концами катушки.

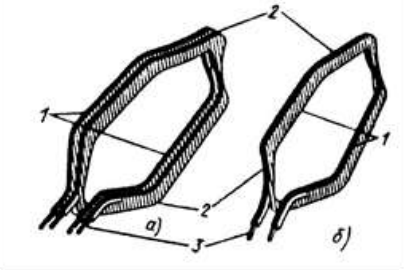


Рис. 3.1. Катушки распределенной обмотки из прямоугольного провода: *а* — подразделенная; *б* — цельная; *1* — пазовые части; *2* — лобовые части; *3* — выводные концы

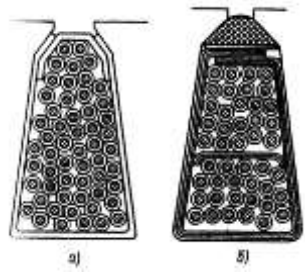


Рис. 3.2. Поперечное сечение полузакрытых пазов статора с обмоткой из круглого провода: *а* — машин малой мощности, однослойная обмотка; *б* — машин средней мощности, двухслойная обмотка

Стороны катушек распределенных обмоток могут занимать либо целый паз, либо только половину (рис. 3.2). В первом случае обмотку называют однослойной, во втором — двухслойной, так как стороны катушек располагают в пазах в два слоя: одна в нижней половине паза — нижний слой, вторая в верхней половине — верхний слой.

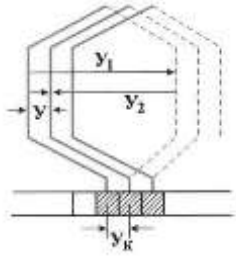


Рис. 3.3. Схематическое изображение элементов петлевой обмотки

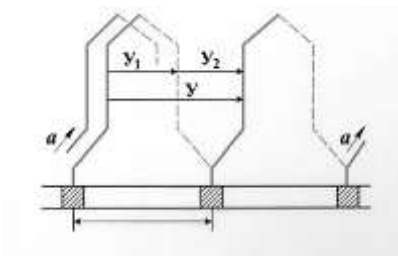


Рис. 3.4. Схематическое изображение элементов волновой обмотки

Некоторые типы обмоток изготовляют не из катушек, а из стержней — стержневая обмотка. Каждый стержень представляет собой как бы катушку, разрезанную пополам по лобовым частям, и состоит из одной пазовой и двух половин разных лобовых частей. Витки стержневой обмотки образуются после укладки обмотки в пазы и соединения головок

стержней друг с другом. В расчетах и схемах стержневая обмотка рассматривается как катушечная с одним витком в катушке.

По направлению отгиба лобовых частей катушек или стержней, который определяет последовательность их соединений между собой, различают петлевые (рис. 3.3) и волновые обмотки (рис. 3.4).

Почти все обмотки ЭМ наматывают изолированным обмоточным проводом. Значительно реже для обмоток используют неизолированную прямоугольную проволоку или медные шины, на которые изоляцию наносят в процессе изготовления катушек.

К изоляции ЭМ предъявляют ряд требований, целью которых является обеспечение надежной работы машины на протяжении всего расчетного срока ее эксплуатации. Изоляция, прежде всего, должна иметь достаточную электрическую прочность для предотвращения возможного замыкания витков обмотки на металлические части машины или между собой. Для обеспечения этого требования изоляция должна обладать хорошей теплопроводностью, так как иначе тепло, выделяемое в проводниках обмотки, нагреет ее выше допустимых пределов и электрическая прочность изоляции снизится. Кроме того, изоляция обмоток не должна заметно ухудшать свои электрические свойства под воздействием механических усилий, которым она подвергается в процессе укладки обмотки в пазы, а также при работе машины, под воздействием влаги, паров масел и различных газов, которые может содержать окружающий машину воздух. Эти требования определяют необходимые для изоляции термическую и механическую прочность, влаго- и маслостойкость и т. п.

По своему функциональному назначению изоляция обмоток подразделяется на корпусную — наружную изоляцию катушек, изолирующую их от стенок пазов в сердечниках (пазовая изоляция) и от других металлических частей машины (изоляция лобовых частей катушек); междуфазную, изолирующую катушки каждой фазы обмотки от других фаз; витковую, изолирующую каждый виток катушки от других витков; проводниковую — изоляцию каждого из проводников обмотки. Каждый из видов изоляции имеет свою, специфическую конструкцию и к ним предъявляются различные требования.

В общем случае толщина и конструкция всех видов изоляции определяются ее функциональным назначением, уровнем номинального напряжения машины, ее типом и условиями эксплуатации, для которых предназначена данная машина.

В наиболее тяжелых условиях при эксплуатации находится корпусная изоляция пазовых частей катушек обмотки. Ограниченные размеры паза приводят к необходимости выполнения пазовой изоляции в виде тонкого и механически прочного слоя, отвечающего всем перечисленным выше требованиям к изоляции ЭМ, т. е. электрической и механи-

ческой прочности, теплопроводности и др. Современные электроизоляционные материалы позволяют выполнить пазовую изоляцию машин с номинальным напряжением до 660 В толщиной, не превышающей нескольких десятых долей миллиметра на сторону, а машин высокого номинального напряжения — толщиной, не превышающей нескольких миллиметров на сторону.

Корпусная изоляция по своей конструкции бывает непрерывной или гильзовой. Непрерывную изоляцию образуют обертыванием проводников катушки по всей их длине лентой изоляционного материала, например микалентой, стекломикалентой или стеклослюдинитовой лентой. Ленту обычно наносят вполперекроя (вполнахлеста) в несколько слоев, число которых зависит от номинального напряжения машины. В большинстве конструкций после наложения ленты изоляцию пропитывают изолирующими составами — лаками или компаундами для создания монолитного изолирующего слоя и увеличения ее теплопроводности и механической прочности. Гильзовую изоляцию образуют обертыванием прямолинейных пазовых частей катушек широким листовым изоляционным материалом с последующей горячей обкатной наложенных слоев (мягкая гильза) или горячей обкаткой, опрессовкой и запечкой (твердая гильза). На изогнутые лобовые части катушек с гильзовой изоляцией наносят непрерывную ленточную изоляцию.

Непрерывную и гильзовую изоляцию применяют для обмоток всех машин напряжением 3000 В и выше, в обмотках якорей МПТ большой мощности, в машинах специального, например, влагостойкого исполнения при любом номинальном напряжении.

Пазовые части обмотки машин напряжением до 6000 В изолируют коробами из одного или двух слоев изоляционного материала — пленкосинтокартона, электронита, имидофлекса и т. п. Пазовые короба устанавливают в пазы до укладки обмотки. Они не могут служить надежной корпусной изоляцией для обмоток машин более высокого напряжения.

Основным элементом якорных обмоток МПТ является секция, в которой может быть один или несколько витков. Выводные концы каждой секции соединены с пластинами коллектора. Несколько секций, пазовые стороны которых размещают в одном слое паза, имеют общую корпусную изоляцию и образуют катушку обмотки. Катушка обмотки якоря имеет столько пар выводных концов, сколько секций она имеет в своем составе (рис. 3.5).

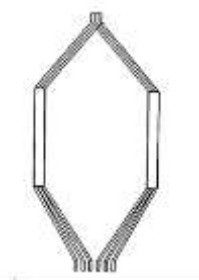


Рис. 3.5 Катушка обмотки якоря машины постоянного тока, состоящая из трех секций

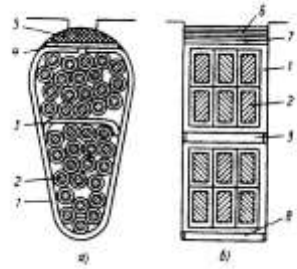


Рис. 3.6 Поперечный разрез пазов якоря: а – с обмоткой круглого провода; б – с обмоткой из прямоугольного провода; 1 – корпусная изоляция; 2 – проводники обмотки; 3 – прокладки между слоями обмотки; 4 – прокладки под клин; 5 – пазовый клин; 6 – проволочный бандаж; 7 – прокладка под бандаж; 8 – прокладка на дне паза

В большинстве машин общего назначения мощностью до 30 ÷ 40 кВт обмотки выполняют из круглого, а в машинах большей мощности — из прямоугольного обмоточного провода. Обмотки из круглого провода укладывают в полузакрытые пазы (рис. 3.6, а). Плотность укладки проводников оценивается коэффициентом заполнения паза.

Зубцовая зона — наиболее напряженный в магнитном отношении участок магнитопровода, поэтому при проектировании машин стремятся выбрать наименьшие размеры пазов, обеспечивающие размещение в них необходимого числа проводников и изоляции. Степень использования объема паза для размещения меди обмотки оценивается коэффициентом заполнения паза медью k_M, представляющим собой отношение суммарной площади поперечного сечении всех проводников в пазу к площади поперечного сечения паза «в свету» $S_{\text{п}}$:

$$k_M = \frac{q_{\text{эл}} n_{\text{эл}} u_{\text{п}}}{S_{\text{п}}}, \qquad (3.1)$$

где $q_{\text{эл}}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника; $n_{\text{эл}}$ — число элементарных проводников в одном эффективном; $u_{\text{п}}$ — число эффективных проводников в пазу.

Коэффициент k_M зависит от общего количества изоляции в пазу, т. е. от толщины корпусной, витковой и проводниковой изоляции и наличия различных изоляционных прокладок. При возрастании толщины изоляции, например, в машинах с более высоким номинальным напряжением или при использовании худших изоляционных материалов,

коэффициент заполнения паза медью уменьшается. Это приводит к ухудшению использования пазового пространства а, следовательно, и всей зубцовой зоны машины.

Средние значения k_M для современных ЭМ в зависимости от номинального напряжения и типа обмоток приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. **Средние значения коэффициентов заполнения паза**

Тип обмотки	значения коэффициентов	
	k_M	$k_з$
Обмотки из круглого провода с эмалевой изоляцией на напряжение до 660 В	0,3	0,72
Обмотки из прямоугольного провода на напряжение 3000 В (провод марки ПСД)	0,22÷0,37	0,7÷0,8
Обмотки из прямоугольного провода на напряжение 6000 В	0,14÷0,25	0,6÷0,7

Для машины с обмотками из прямоугольных проводов k_M можно рассчитать достаточно точно, так как при проектировании заранее определяют местоположение каждого проводника в пазу.

В обмотках из круглого провода положение каждого проводника в пазу заранее определить нельзя. Кроме того, плотность размещения проводников в пазу непостоянна. Она зависит от усилий, прикладываемых обмотчиком при уплотнении проводников по мере укладки их в пазы. Опытом установлено, что при чрезмерно большой плотности укладки круглых проводов трудоемкость обмоточных работ неоправданно возрастает, а надежность обмотки резко ухудшается из-за возникающих при этом механических повреждений проводниковой изоляции.

Плотность укладки проводников в пазы оценивается технологическим коэффициентом заполнения проводниками свободной от изоляции площади поперечного сечения паза:

$$k_з = \frac{{d_{из}}^2 n_{из} u_п}{S_п'} \quad , \qquad (3.2)$$

Числителем этого выражения является произведение площади квадрата, описанного вокруг изолированного элементарного проводника с диаметром $d_{из}$ на число всех элементарных проводников в пазу $n_{из}u_п$, а знаменателем — площадь поперечного сечения паза, свободная от изоляции $S_п'$, т. е. та площадь, в которой располагаются проводники обмотки. Коэффициент $k_з$ обычно называют коэффициентом заполнения паза. Он характеризует только технологичность укладки обмотки из круглого провода, а не степень использования объ-

ема паза для размещения проводников обмотки. Так, при одной и той же плотности укладки обмотки, $k_з$ будет одинаков для обмоток машин с разной толщиной пазовой или проводниковой изоляции, при двухслойной или однослойной обмотках и т. п.

В современном электромашиностроении плотность укладки обмотки стремятся выполнить такой, чтобы $k_з$ был в пределах 0,7 ÷ 0,75, причем меньшие значения — в машинах с числом полюсов, равным двум.

Следует отметить, что увеличение числа элементарных проводников в одном эффективном, т. е. применение обмоточного провода меньшего диаметра при прежней площади эффективного проводника, приводит к некоторому возрастанию коэффициента заполнения, и наоборот. Это объясняется тем, что толщина изоляции обмоточного провода остается постоянной при сравнительно больших изменениях диаметра круглых обмоточных проводов (табл. 3.1).

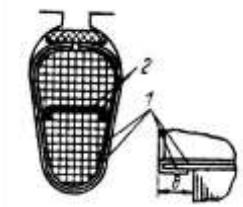
Пример исполнения изоляции обмоток из круглого провода приведен в табл. 3.2. Корпусная изоляция пазовой части катушек выполнена пазовым коробом из одного или двух слоев изоляционного материала. Для повышения надежности короба в местах выхода его из пазов по торцам якоря он завернут в виде манжеты. Прокладки между слоями обмотки в пазу выполнены из того же материала, что и короб. В лобовых частях секции и катушки дополнительно не изолируют.

В табл. 3.3 показано исполнение изоляции обмоток якоря двигателей 4П100 и 4ПФ132. Обмотки рассчитаны на механизированную укладку. Проводники закреплены в пазах пазовыми крышками, выполненными из того же материала, что и короб.

В обмотке из прямоугольного провода проводники располагают своей широкой стороной параллельно боковой грани паза (рис. 3.6, б), причем проводники одной секции укладывают друг над другом, а пазовые стороны секций, составляющих одну катушку, — в одном по высоте слое паза — в верхнем или в нижнем. Подобное расположение принято для выравнивания индуктивного сопротивления секций, принадлежащих одной катушке, так как оно существенно зависит от размещения проводников по высоте паза.

Число витков в секции обмотки из прямоугольного провода обычно не превышает одного - двух, реже — трех или четырех витков. Одновитковые секции могут быть выполнены стержневыми, что облегчает их укладку в пазы, но делает необходимой дополнительную операцию — пайку головок стержней друг с другом после укладки обмотки. Секции с двумя и с большим числом витков выполняют, если это позволяет место, с двойными головками, что облегчает соединение выводов секций с пластинами коллектора и несколько уменьшает вылет лобовых частей катушек, а, следовательно, и общую длину машины (рис. 3.7).

Таблица 3.2. **Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы овальные полузакрытые; обмотка двухслойная всыпная из круглого эмалированного провода; напряжение до 600 В)**



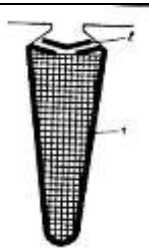
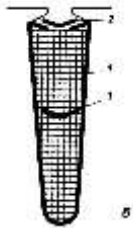
Высота оси вращения h, мм	Позиция	Материал			Число слоев	Односторонняя Толщина изоляции, мм
		Класс нагревостойкости		Толщина, мм		
		B	F и H			
80÷112	1	Изофлекс	Имидофлекс	0,35	1	0,35
	2	-//-	-//-	0,35	1	0,35
132÷200	1	-//-	-//-	0,25	2	0,5
	2	-//-	-//-	0,25	2	0,5

Примечание: Прокладку между катушками в лобовых частях обмотки выполняют из изофлекса.

Обмотки из прямоугольного провода имеют гильзовую или непрерывную изоляцию (табл. 3.4 ÷ 3.6). В машинах на напряжение свыше 600 В дополнительно изолируют промежуточные (средние, через одну) секции в пазовых и лобовых частях.

Обмотку якоря закрепляют в пазах клиньями или бандажами. Для крепления обмоток из круглого провода пользуются только клиньями. Обмотку из прямоугольного провода в двигателях с высотой оси вращения не более 315 мм большей частью крепят в пазовой части бандажами из стальной немагнитной проволоки или из нетканой стеклоленты. Бандажи располагают в кольцевых бандажных канавках сердечника якоря (рис. 3.8), которые образуются при шихтовке сердечника листами магнитопровода с меньшим диаметром. По длине якоря располагают несколько канавок; длина каждой из них 15 ÷ 20 мм, а общая длина всех канавок на якоре обычно не превышает приблизительно 1/3 конструктивной длины сердечника якоря.

Таблица 3.3. **Изоляция обмотки якоря двигателей серии 4П**
(пазы полузакрытые, обмоточный провод ПЭТ-155; двигатели 4П с h = 80÷160 мм — рис. а; двигатели 4ПФ с h = 112...200 мм — рис. б)

Рисунок	Позиция	Материал	Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
	1	Пленкокартон ПСК – А – 175	1	0,3
	2	То же	1	0,3
	1	Плекокартон ПСК – ЛП – 125	1	0,35
	2	То же	1	0,35
	3	-//-	1	0,35

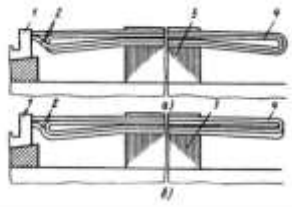


Рис. 3.7. Секции обмотки в пазах якоря: а – с одинарной головкой; б – с двойной головкой; 1 – пластина коллектора; 2 – выводные концы секции; 3 – сердечник якоря; 4 – головка секции

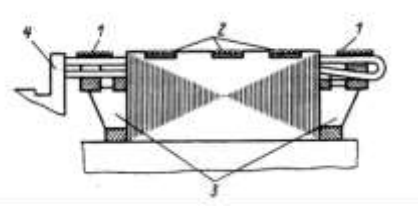


Рис. 3.8. Крепление обмотки якоря бандажами: 1 – бандажи на лобовых частях; 2 – бандажи на пазовой части; 3 – обмоткодержатели; 4 – коллекторная пластина

Таблица 3.4. **Изоляция обмотки машин постоянного тока**

(пазы открытые, обмотки из прямоугольного провода,
h = 225÷315 мм, напряжение 600 В)

Часть обмотки	Позиция	Материал			Число слоев				Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка			Толщина, мм		Класс нагревостойкости		По ширине	По высоте при w_s			
		Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости					1	2	3	4
		B	E	H	B	F и H	B	F и H					
Пазовая	1	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синфолий F	Синфолий H	0,15	0,16	4,5 оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2	То же	То же	То же	0,15	0,16	0 - 6		-	-	0,3	0,6	0,9
	3	Стеклолакоткань ЛСП			0,15		1	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
		Стеклотекстолит											
	4	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5

продолжение табл.3.4

	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5
		Допуск на укладку обмотки						0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина или без высоты бандажной канавки)						1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
Лобовая	7	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-934-ТП		Пленка полиимидная ПМ 0,5	0,15	1 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)						1	1	1	1	1

В двигателях с h > 315 мм пазовые части обмоток крепят клиньями из стеклотекстолита.

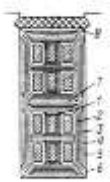
Лобовые части всех обмоток якоря крепят бандажами из нетканой стеклоленты, а в машинах больших габаритов и с большой частотой вращения — из стальной немагнитной проволоки.

Для обмоток якорей все более широко применяют корпусную изоляцию типа «монолит», состоящую из стеклослюдинитовых или слюдопластовых материалов на эпоксидных связующих. Эта изоляция помимо высокой электрической и механической прочности обладает очень хорошей адгезией. В обмотках с такой изоляцией в ряде случаев можно не устанавливать пазовых клиньев.

Недостатком изоляции типа «монолит» является сложность ремонта обмотки, так как после запечки изоляции удалить обмотку из пазов крайне трудно.

Таблица 3.5. **Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока**

(пазы прямоугольные открытые; обмотка двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная из прямоугольного провода марки ПСД; h = 350÷500 мм; напряжение до 1000 В; класс нагревостойкости В)

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм				
					По ширине при числе $U_п$				По высоте
		Наименование, марка	Толщина, мм		2	3	4	5	
Пазовая	1	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впри-тык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Лента стеклослюдопластовая ЛИ-СК-ТТ	0,1	1 впри-тык	0,28	0,28	0,28	0,28	1,12
	3	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	1,12
	4	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впри-тык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
	5	Стеклолакоткань ЛСП-130/155	1	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	6	Стеклотекстолит СТ	0,5	1	-	-	-	-	0,5
	7	То же	0,5	1	-	-	-	-	0,5
	8	То же	0,5	1	-	-	-	-	0,5
		Допуск на укладку обмотки	-	-	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5
		Всего на паз (без витковой Изоляции и клина)	-	-	2,14	2,14	2,44	2,54	6,24

продолжение табл.3.5

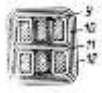
Лобовая	9	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впри-тык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	10	Стекло-слюдо-пластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 впри-тык	0,28	0,28	0,28	0,28	0,56
	11	Стекло-слюдо-пластовая лента ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	12	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впри–тык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Разбухание изоляции от пропитки	-	-	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3
		Общая толщина иоляции кату-ши в лобо-вой чсти (без вит-ковой)	-	-	1,54	1,54	1,64	1,74	2,02

Таблица 3.6. **Изоляция обмотки якоря двигателя постоянного тока**
(пазы прямоугольные открытые); обмотка двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная из прямоугольного провода марки ПСД (класс нагревостойкости F) и ПСДК (класс нагревостойкости H); h = 355÷500 мм; напряжение до 1000 В

Часть обмотки	Позиция	Материал				Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка		Толщина, мм				По ширине при числе $U_п$				По высоте
		Класс нагревостойкости		Класс нагревостойкости				2	3	4	5	
		F	H	F	H	F	H					
Пазовая	1	Стеклянная лента ЛЭС	Полиамидная пленка ПМ	0,1	0,05	Полиамидная пленка ПМ	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	3	Пленка полиамидная ПМ		0,05		3 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	4	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	5	Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	6	Фенилоновая бумага		0,2		1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	7	Стеклотекстолит СТЭФ	СТК	0,5		1		-	-	-	-	0,5
	8	СТЭФ	СТК	0,5		1		-	-	-	-	0,5
	9	СТЭФ	СТК	0,5		1		-	-	-	-	0,5
		Допуск на укладку обмотки		-		-		0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
		Всего на паз (без витковой изоляции и клина)		-		-		2,1	2,1	2,3	2,3	5,8

продолжение табл.3.6

Лобовая	10	Стеклянная лента ЛЭС	Полиамидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	11	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	12	Пленка полиамидная ПМ		0,05		2 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	13	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	14	Лента стеклянная ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)		-		-		1,2	1,2	1,4	1,4	1,5

Обмотки якоря подразделяют по направлению отгиба лобовых частей на волновые и петлевые и, в зависимости от схем соединений, на простые и сложные. Соотношения размеров и схемы обмоток характеризуются двумя частичными и результирующими шагами, шагом по коллектору и шагом по пазам якоря (рис. 3.3). Частичные шаги (первый — y_1, второй — y_2) и результирующий шаг y измеряются в так называемых элементарных пазах, не имеющих эквивалента в линейных размерах. Под элементарным понимают условный паз, в котором как бы расположено по одной секционной стороне обмотки в каждом слое. Отсюда число элементарных пазов $Z_э$, число секций во всей обмотке якоря S, число пластин коллектора K и число пазов якоря Z связаны следующим соотношением: $Z_э = S = K = Z \cdot u_п$, где $u_п$ – число секционных сторон в пазу якоря.

Шаг обмотки по коллектору $y_к$ определяет расстояние между началом и концом секции по окружности коллектора в коллекторных делениях $t_к = \pi D_к / K$, где $D_к$ - наружный диаметр коллектора.

Шаг обмотки по пазам (y_z) определяет расстояние между сторонами катушки или секции в зубцовых делениях якоря $t_z = \pi D_a / Z$, где D_a — наружный диаметр якоря.

Схемы обмоток якорей МПТ изображают на чертежах в виде торцевых (вид со стороны коллектора) или развернутых схем. Наибольшее распространение получили развернутые схемы. Их изображение имеет ряд особенностей, связанных с тем, что каждая катушка обмотки якоря состоит из нескольких секций и имеет столько пар выводных концов,

сколько секций содержится в ней. Выводные концы секций соединены с пластинами коллектора. Поэтому на схеме обмотки якоря нужно либо каждую секцию изображать отдельным многоугольником, либо показывать пазовые части катушки одной линией, а лобовые части каждой секции — отрезками, соединенными с концами пазовой части и с пластинами коллектора. Последний способ изображения встречается чаще.

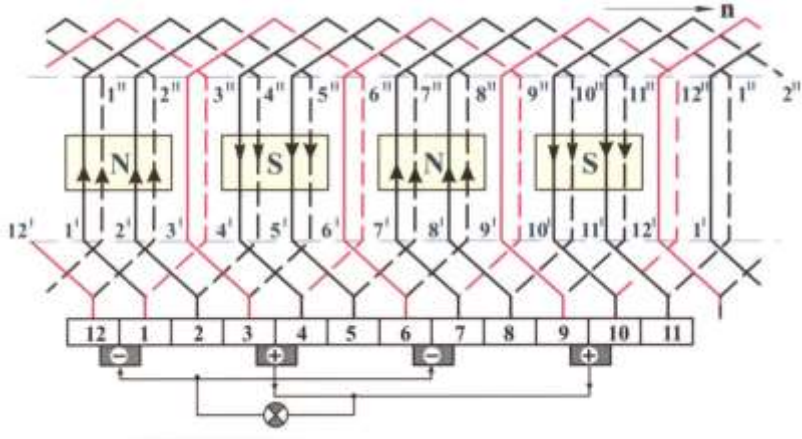


Рис. 3.9. Схема простой петлевой обмотки якоря, $Z = Z_э = 12$, $2p = 4$

На рис. 3.9 приведена развернутая схема простой петлевой обмотки. Пазовые и лобовые части катушек изображены в зависимости от их положения в пазу сплошными или пунктирными линиями. Начала и концы секций соединяют с пластинами коллектора. На схемах на коллекторных пластинах обычно показывают места расположения щеток.

Схемы обмоток якорей, как правило, состоят из ряда повторяющихся одинаковых элементов, поэтому полное представление об обмотке могут дать и сокращенные, так называемые практические схемы.

В большинстве обмоток первый частичный шаг секции y_1 выбирают кратным числу секций в слое паза $u_п$. В этом случае шаги по пазам катушек и всех секций обмотки одинаковые ($y_z = y_1/u_п$) и обмотку называют равносекционной. Если же $y_1/u_п$ не равно целому числу, то у секций будут разные шаги по пазам якоря. Такую обмотку нельзя выполнить из целых катушек. Она называется ступенчатой, выполняется только в стержневых обмотках и редко встречается в практике.

Обмотку якоря с $u_п = 1$ выполняют крайне редко, так как в этом случае необоснованно увеличивается число пазов и ухудшается их заполнение проводниками, потому что толщина корпусной изоляции ка-

тушки, состоящей из одной или из нескольких секций, остается одинаковой.

В простых петлевых обмотках якоря (см. рис. 3.3) результирующий шаг равен шагу по коллектору:

$$y = y_к = y_1 - y_2 = \pm 1 \qquad (3.3)$$

Большее распространение получили обмотки с $y = 1$, так как при $y = -1$ лобовые части секций несколько удлиняются и в них возникает дополнительное перекрещивание выводных концов. Первый частичный шаг петлевой обмотки выбирают близким к полюсному делению:

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \pm \varepsilon \qquad (3.4)$$

где ε — наименьшее число (или дробь), при котором y_1 выражен целым числом, кратным числу $u_п$. Значение ε характеризует укорочение (удлинение) шага по сравнению с полюсным делением. Обмотки с укороченным шагом применяются чаще.

При простой петлевой обмотке щетки на коллекторе должны быть расположены обязательно через каждое полюсное деление. Замыкая пластины коллектора, они образуют в обмотке *2p* параллельных ветвей (рис. 3.10). Поэтому в простой петлевой обмотке число параллельных ветвей всегда равно числу полюсов машины: *2a = 2p*.

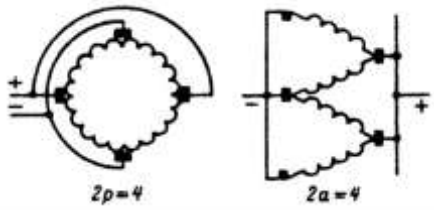


Рис. 3.10. Параллельные ветви простой петлевой обмотки

Параллельные ветви в петлевой обмотке содержат несколько последовательно соединенных между собой секций, в каждой из которых во время работы машины наводится ЭДС. При сборке машины из-за допусков при штамповке и шихтовке сердечника, неравномерности воздушного зазора под разными полюсами и ряда других причин всегда существует некоторая асимметрия магнитной цепи. Поэтому ЭДС, наводимые в секциях в разных параллельных ветвях, немного отличаются друг от друга. Сопротивления параллельных ветвей практически всегда различаются между собой из-за различного качества паек

мест соединений секций и пластин коллектора. По этим причинам токи в параллельных ветвях петлевой обмотки якоря никогда не бывают абсолютно одинаковые, так как в ветвях обмотки циркулируют уравнительные токи. Они замыкаются через скользящие контакты между щетками и поверхностью коллектора и перегружают их, при этом коммутация машин ухудшается, появляется искрение под щетками, пластины подгорают и коллектор быстрее выходит из строя.

Чтобы разгрузить щеточные контакты от уравнительных токов, в якорях с петлевой обмоткой устанавливают уравнительные соединения первого рода. Уравнительные соединения — это изолированные проводники, которые соединяют точки обмотки, имеющие теоретически одинаковые потенциалы. Уравнительные соединения не уменьшают уравнительные токи, а лишь направляют их по безвредному для работы машины пути, обеспечивая нормальную работу щеточного контакта без перегрузки, создаваемой уравнительными токами.

В простой петлевой обмотке одинаковые потенциалы должны быть у всех секций, расположенных на расстоянии двойного полюсного деления друг от друга. Поэтому шаг уравнительных соединений $y_{\text{ур}} = K/p$. Наиболее удобные места для подсоединения уравнителей к секциям — это коллекторные пластины или головки лобовых частей секций со стороны, противоположной коллектору.

Уравнительные соединения первого рода выполняют проводниками с площадью поперечного сечения, равной 20 ÷ 30 % сечения эффективного проводника обмотки. В машинах общего назначения чаще всего устанавливают по два - три уравнительных соединения на каждую пару параллельных ветвей или по одному уравнительному соединению на паз якоря, т. е. в 3 — 4 раза меньше, чем секций в обмотке.

При установке уравнительных соединений усложняется технологический процесс изготовления якоря и увеличивается расход меди, поэтому петлевые обмотки применяют лишь в машинах, в которых не могут быть выполнены простые волновые обмотки.

Схема простой волновой обмотки якоря приведена на рис. 3.11. Обозначения шагов обмотки показаны на рис. 3.4. Шаг простой волновой обмотки по коллектору равен результирующему шагу:

$$y_{\text{к}} = y = \frac{K \pm 1}{p}. \qquad (3.5)$$

В этой формуле знак «—» предпочтительный, так как при знаке «+» в обмотке появляются дополнительные перекрещивания выводных концов секций. Для первого частичного шага $y_1 = \frac{Z_{\text{э}}}{2p} \pm \varepsilon$ сохраняется следующее условие: $y_1/u_{\text{п}}$ равно целому числу, иначе обмотка будет ступенчатой. Второй частичный шаг $y_2 = y - y_1$.

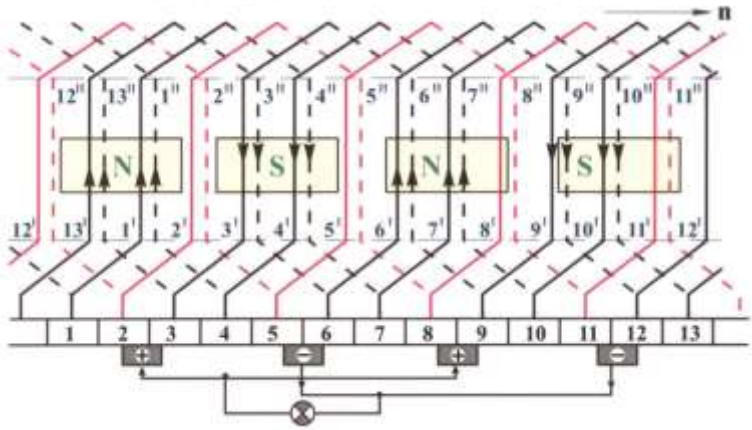


Рис. 3.11. Схема простой волновой обмотки якоря, $Z = Z_э = 13$, $2p = 4$

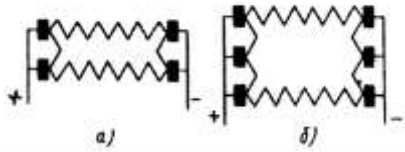


Рис. 3.12. Параллельные ветви в простой волновой обмотке: а) с 2p = 4, б) с 2p = 6

Секции волновой обмотки соединяют друг с другом последовательно с результирующим шагом, близким к двойному полюсному делению. Поэтому при установке щеток на коллектор обмотка соединяется в две параллельные ветви независимо от числа полюсов машины. В простых волновых обмотках всегда $2a = 2$ (рис. 3.12). Особенностью обмоток является также возможность работы машины при неполном числе щеточных болтов.

Действительно, как видно из рисунка 3.12, уменьшение числа щеточных болтов не приводит к изменению направления токов в параллельных ветвях обмотки. Это обстоятельство используют, например, в ряде тяговых ДПТ, в которых размещение полного числа щеточных болтов, равного $2p$, затруднено из-за недостатка места.

При $2a = 2$ в обмотке отсутствуют эквипотенциальные точки и установка уравнительных соединений не требуется. Поэтому волновые обмотки более технологичны и дешевы по сравнению с петлевыми. Простые волновые обмотки применяют в большинстве машин, номи-

нальный ток которых не превышает 500÷600 А, т. е. ток в каждой параллельной ветви волновой обмотки остается меньшим 250÷300 А.

Простые волновые обмотки могут быть выполнены симметричными только при условии, что $y_к = (K \pm 1)/p$ равно целому числу. Это накладывает определенные ограничения на соотношение чисел К и р. В частности, машины общего назначения мощностью до 200÷300 кВт выпускают в большинстве случаев в четырехполюсном исполнении, т. е. с р = 2. Следовательно, для обеспечения симметрии обмотки коллектор якоря должен содержать нечетное число пластин. Но так как $K = Z \cdot u_п$, то нечетными должны быть также число пазов якоря Z и число секций в катушке $u_п$. В ряде случаев эти условия невыполнимы при заданных линейной нагрузке и уровнях магнитной индукции на участках магнитопровода. В таких якорях при $(K \pm 1)/p$, не равном целому числу, могут быть выполнены несимметричные волновые обмотки: обмотка с мертвой секцией или искусственно замкнутая обмотка.

Обмотка с мертвой секцией применяется реже. Для ее выполнения коллектор машины берут с числом пластин, на одну меньшим, чем число секций в обмотке якоря, т. е. с нечетным числом пластин: $K' = Z \cdot u_п - 1$. Тогда $y_к = (K' \pm 1)/p$ равно целому числу. По рассчитанному $y_к$ находят частичные шаги y_1 и y_2 и строят волновую обмотку. Число секций в обмотке $S = Z \cdot u_п$, т. е. на одну больше, чем пластин коллектора. В пазы укладывают все секции, но одну из них не соединяют с коллектором. Образуется «мертвая секция». Выводные концы этой секции подрезают и изолируют; лобовые части закрепляют бандажом вместе со всей обмоткой.

Обмотки с мертвой секцией встречаются в машинах, коллекторы которых имеют большое (К > 100) число коллекторных пластин, при этом возникающая несимметрия практически незаметна.

Мертвую секцию можно было бы вообще не укладывать в пазы якоря, однако это нарушает последовательность укладки обмотки и требует заполнения оставшихся свободными частей пазов изоляционным материалом и дополнительных мер при балансировке якоря.

В машинах с большими номинальными токами при петлевой обмотке якоря токи в каждой из параллельных ветвей могут превосходить допустимые, т. е. быть выше 250÷300 А. Для увеличения числа параллельных ветвей обмотку якоря выполняют сложной петлевой. На рис. 3.13 показан элемент схемы одного из типов сложной обмотки — двухходовой петлевой. Она состоит как бы из двух самостоятельных простых петлевых обмоток (на рис. 3.13 показаны линиями разной толщины). Секции одной из них расположены в нечетных элементарных пазах якоря и соединены с нечетными пластинами коллектора. Секции другой расположены в четных элементарных пазах и соединены с четными пластинами коллектора. Шаг обмоток по коллектору $y_к = 2$. Ши-

рина щеток должна быть такой, чтобы они одновременно замыкали секции обеих обмоток. В каждой из отдельных простых обмоток $2a = 2p$. При установке щеток на коллектор обе обмотки соединяют параллельно и общее число параллельных ветвей обмотки удваивается. В общем случае, если сложная обмотка состоит из m простых, шаг по коллектору каждой из них будет равен $y_к = m$, а общее число параллельных ветвей после установки щеток $2a = 2pm$, где m — число ходов, т. е. число простых обмоток, составляющих сложную.

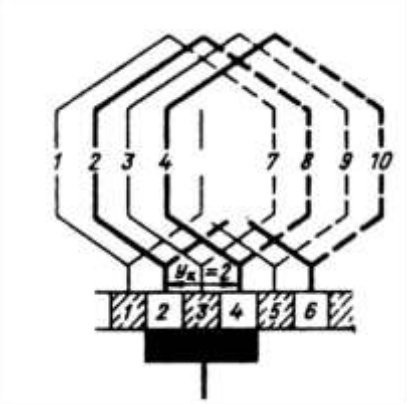


Рис. 3.13. Элемент сложной двухходовой петлевой обмотки

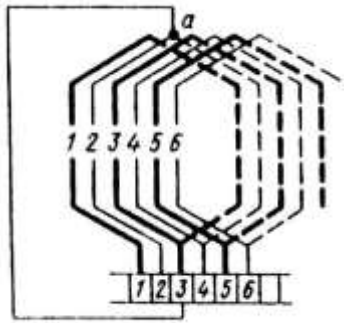


Рис. 3.14. Уравнительные соединения второго рода в двухходовых петлевых обмотках.

Если в сложной петлевой обмотке K/m — целое число, то составляющие ее простые обмотки до установки щеток на коллектор электрически не соединены между собой. Каждая из них замыкается сама на себя после обхода по пазам якоря. Такие сложные обмотки называют m-кратнозамкнутыми. При K/m, не равном целому числу, обмотка замыкается только 1 раз после последовательных m обходов всех пазов якоря. Такие обмотки называют однократнозамкнутыми. В сложных петлевых обмотках точки с теоретически равным потенциалом располагаются не только в пределах каждого хода обмотки (в пределах каждой из простых обмоток), но и на разных ходах. Так, например, на элементе схемы двухходовой петлевой обмотки (рис. 3.14) одинаковый потенциал должен быть у точки, обозначенной на схеме буквой a, принадлежащей одной из простых петлевых обмоток якоря и у вывода секции второй простой обмотки, расположенной в пазу 3, соединенном с пласти-

ной 3. Это объясняется равенством напряжений между пластинами: $U_{к23} = U_{к34}$.

Соединения точек равного потенциала, расположенных на разных ходах (разных простых обмотках, образующих сложную), называют уравнительными соединениями второго рода.

В машинах специальных исполнений находят применение также и сложные волновые обмотки с $y_к = (K \pm m)/p$. В них число параллельных ветвей увеличивается в m раз по сравнению с простыми обмотками, т. е. $2a = 2m$. В сложных волновых обмотках, как и в сложных петлевых, необходима установка уравнительных соединений второго рода.

В ряде машин средней мощности для снижения токов в параллельных ветвях и с целью избежать необходимости установки уравнительных соединений применяют комбинированную, так называемую лягушачью обмотку.

Катушка лягушачьей обмотки состоит из секций петлевой и волновой обмоток, соединенных с пластинами одного коллектора. Таким образом, в пазах якоря размещаются как бы две самостоятельные обмотки — волновая и петлевая, соединенные через коллектор параллельно. Числа параллельных ветвей в обеих обмотках должны быть одинаковыми, поэтому волновая обмотка выполняется сложной. Общее число параллельных ветвей лягушачьей обмотки становится в 2 раза больше, чем в петлевой. Достоинством такой обмотки является отсутствие необходимости установки уравнительных соединений. Это объясняется тем, что секции волновой обмотки выполняют роль уравнительных соединений первого рода для петлевой обмотки, а секции петлевой обмотки — роль уравнительных соединений второго рода для сложной волновой.

Тип обмотки и число параллельных ветвей определяют, исходя из принятого числа главных полюсов $2p$ и тока параллельной ветви I_a. Число главных полюсов МПТ общего назначения в зависимости от диаметра можно принимать: $2p = 2$ при D до 100 мм и $2p = 4$ при D = 112÷500 мм.

Для расчета числа параллельных ветвей определяют предварительное значение тока якоря, А:

для генераторов $I = \frac{P_н}{U}(1 + k_B)$ (3.6)

для двигателей $I = \frac{P_н}{U}(1 - k_B)$ (3.7)

Значения коэффициентов k_B, приведены в табл. 2.1.

Исходя из принятого числа главных полюсов $2p$, предварительного значения тока якоря I и допустимого тока параллельной ветви $I_a = 250 \div 300$ А принимают тип обмотки.

При токах якоря до 600 А выбирают простую волновую обмотку, от 500 до 1400 А — простую петлевую обмотку. Число проводников обмотки якоря

$$N = \frac{A\pi D 2a}{I} \qquad (3.8)$$

Согласно ориентировочным значениям зубцового деления t_{Z1} определяют число пазов якоря:

$$Z = \frac{\pi D}{t_{Z1}} \qquad (3.9)$$

Ориентировочные значения t_{Z1} для различных высот оси вращения следующие:

Таблица 3.7. **Ориентировочные значения t_{Z1} для различных высот оси вращения**

h, мм	80÷200	225÷315	355÷500
t_{Z1}, мм	10÷20	15÷35	18÷40

Число эффективных проводников обмотки в пазу *N/Z* должно быть в двухслойных обмотках четным числом.

По условиям коммутации пазовый ток $I_{\text{п}} = At_{Z1}$ не должен превышать 1500÷1600 А при D < 1000 мм.

Для расчета числа коллекторных пластин K и числа секционных сторон в пазу $u_{\text{п}}$ целесообразно рассмотреть несколько вариантов выполнения обмотки. Результаты расчета удобно представить в виде таблицы:

Таблица 3.8. **Выбор числа коллекторных пластин**

№ варианта	$u_{\text{п}}$	$K = u_{\text{п}}Z$	$w_c = \frac{N}{2K}$	$U_{\text{к.ср}} = \frac{2pU_{\text{н}}}{K}$
1				
2				
…				

При сравнении вариантов следует учесть, что в двигателях с полузакрытыми пазами всыпная обмотка из круглых проводников может иметь дробное число витков секции w_c, так как в этом случае допускается выполнение секций, расположенных в одном пазу с разным числом витков. Например, в некоторых машинах серии 2П при волновой обмотке с $u_{\text{п}} = 3$ число витков в секциях принято равным 1-2-1, 2-1-2, 5-4-5.

При открытых пазах и проводах прямоугольного сечения значения w_c должны округляться до ближайшего целого числа.

Максимальное число коллекторных пластин K должно оцениваться по минимально допустимому значению коллекторного деления, которое в зависимости от диаметра коллектора должно быть не менее:

Таблица 3.9. **Значения t_k для различных диаметров коллектора**

D_k, мм	125	140÷280	315÷500
t_k, мм	3	3,5	3,8

Для серийных машин без компенсационной обмотки допускается $U_{\text{к.ср}}$ до 16 В, для машин с компенсационной обмоткой $U_{\text{к.ср}} \leq 20$В, для машин малой мощности (до 1 кВт) $U_{\text{к.ср}} \leq 25 \div 30$В. Для расчета коллекторного деления t_k необходимо выбрать внешний диаметр коллектора D_k, из следующего ряда по ГОСТ 19780—81: 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160, 180 200 224, 250, 280, 315, 355, 400, 450 мм.

Диаметр коллектора D_k при открытых пазах якоря должен находиться в пределах

$$D_k = (0{,}65 \div 0{,}7). \qquad (3.10)$$

При полузакрытых пазах якоря и отсутствии петушков на коллекторе

$$D_k = (0{,}65 \div 0{,}8). \qquad (3.11)$$

После выбора варианта обмотки необходимо уточнить линейную нагрузку

$$A = \frac{2u_{\text{п}} Z w_c I_a}{\pi D} \qquad (3.12)$$

и скорректировать расчетную длину машины.

Поперечное сечение эффективного проводника обмотки якоря, м^2,

$$q_a = \frac{I}{2aJ_a} \qquad (3.13)$$

где J_a — плотность тока, А/м^2.

Плотность тока предварительно выбирают, используя зависимости произведения AJ от класса нагревостойкости изоляции (рис. 3.15), построенные по данным серийных машин постоянного тока.

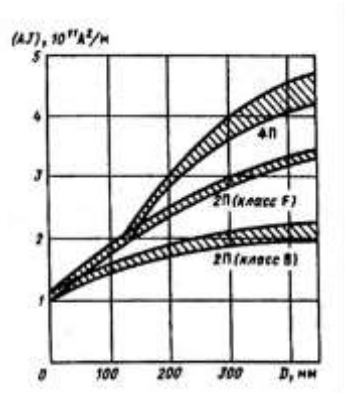


Рис. 3.15. Зависимость произведения AJ от диаметра якоря

Для всыпных обмоток якоря с полузакрытыми пазами следует выбрать круглый провод марки ПЭТВ при классе нагревостойкости В. При классе нагревостойкости Н могут быть применены провода марки ПСДТК. Диаметр изолированного провода не должен превышать 1,8 мм.

Эффективные проводники всыпных обмоток обычно состоят из нескольких элементарных проводников. Число элементарных проводников $n_{эл}$ и сечение элементарного проводника $q_{эл}$ определяют из равенства

$$q_a = n_{эл} q_{эл} \qquad (3.14)$$

где $n_{эл}$ должно быть целым числом.

Сечение и размеры прямоугольных проводников обмотки якоря с открытыми пазами определяют при расчете размеров паза и зубца.

Форма паза и геометрии зубцовой зоны в целом зависят от диаметра якоря, типа и конструкции обмотки.

Наиболее целесообразной, с точки зрения технологии обмоточных работ, формой паза является открытый паз с параллельными стенками. При прямоугольной форме проводников эти пазы имеют высокий коэффициент заполнения.

Однако при открытых пазах увеличивается коэффициент воздушного зазора, возрастают пульсация магнитного потока и зубцовые гармонические электромагнитного момента. Увеличиваются также поверхностные и пульсационные добавочные потери в магнитной системе.

При диаметрах якоря до 50 мм для упрощения формы штампа допускается применение пазов круглой формы.

При выбранной форме паза исходной величиной в расчетах геометрии зубцовой зоны является площадь паза, которая должна быть достаточной только для размещения в пазу проводников обмотки якоря, изоляции и крепления (клина).

Овальные пазы якоря. При овальной форме паза зубцы выполняют с равновеликим по высоте сечением (рис. 3.16). Ширина зубца предварительно

$$b_Z = \frac{B_\delta t_{Z1}}{k_c B_Z} \qquad (3.15)$$

где B_Z — допустимое значение индукции в зубцах, Тл; k_c — коэффициент заполнения пакета якоря сталью (табл. 3.10).

Таблица 3.10. **Коэффициент заполнения пакета сталью k_c**

Толщина листа, мм	Изоляция листов	
	оксидированных	лакированных
1	0,98	0,97
0,5	0,95	0,93
0,35	0,93	0,91
0,3	0,92	0,89
0,28	0,91	0,88

Значения магнитной индукции B_Z в зависимости от частоты перемагничивания, степени защиты и способа охлаждения могут быть приняты согласно данным табл. 3.11.

Высоту паза $h_п$ предварительно выбирают согласно рис. 3.17. Предварительно выбранные значения размеров паза уточняют на основании расчетов индукций в соответствующих участках магнитной цепи зубцовой зоны и размещении обмоток в пазах. Одновременно необходимо иметь в виду, что высота ярма якоря h_j (см. рис. 3.16) должна быть более или равной значению h_{jmin}, при котором магнитная индукция в спинке якоря является предельно допустимой (табл. 3.12).

Таблица 3.11. **Значения магнитной индукции в зависимости от частоты перемагничивания**

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция *Bz*, Тл, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	25 и ниже
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,65-1,85	1,75-1,95	1,85-2,05	1,9-2,1
IP44, IC0141	1,4-1,6	1,5-1,7	1,55-1,75	1,6-1,8
IP44, IC004I	1,3-1,5	1,3-1,6	1,5-1,7	1,55-1,75

Таблица 3.12. **Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения**

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция *Bj*, Тл, при частоте перемагничивания, Гц	
	50-100	до 50
IP22, IC01, IP22, IC17, IP44, IC37	1,4	1,45
IP44, IC0141	1,15	1,2
IP43, IC0041	1,05	1,1

Примечание. При числе полюсов *2p = 2* предельные значения *Bj* можно увеличить на 0,2 Тл.

Минимальная высота спинки якоря h_{jmin} равна

$$h_{jmin} = \frac{\Phi}{2lkB_j} + \frac{2}{3}d_f, \qquad (3.16)$$

где Φ — магнитный поток в воздушном зазоре, Вб; l — длина пакета якоря, м; d_f — диаметр аксиальных вентиляционных каналов, м, *Bj* — индукция в спинке якоря.

Обычно магнитопроводы якорей с овальными пазами выполняются без аксиальных каналов, и только в некоторых случаях при высотах оси вращения $h \geq 200$ мм и диаметрах якоря свыше 200 мм выполняется один ряд аксиальных каналов.

При расчете $h_п$ и h_j необходимо задаться значением внутреннего диаметра листов якоря D_0 (см. рис. 3.16).

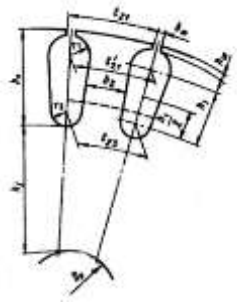


Рис. 3.16. Размеры полузакрытых пазов овальной формы

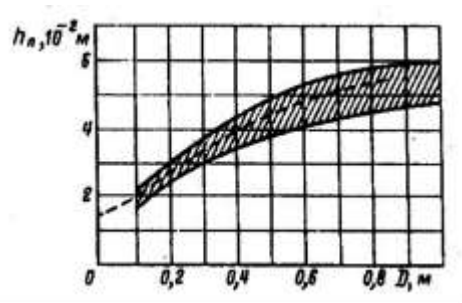


Рис. 3.17. Зависимость высоты паза от диаметра якоря

Это значение приближенно определяют по формуле:

$$D_0 \approx 27 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_н}{n_н}}, \qquad (3.17)$$

Для машин серии 2П внутренний диаметр D_0 можно определить по табл. 3.13.

Таблица 3.13. **Внутренний диаметр машин серии 2П**

h, мм	90	110	112	132	160	180	200
D, мм	90	106	110	132	156	180	200
D_0, мм	24	28	38	50	55	60	65

При выбранной ширине зубца b_z и установленном значении $h_п$ определяют размеры и площадь сечения паза (см. рис. 3.16):

высота шлица $h_ш \approx 0{,}5 \div 0{,}8$ мм;

ширина шлица принимается больше суммы максимального диаметра изолированного проводника и двусторонней толщины изоляции;

больший радиус

$$r_1 = \frac{\pi(D-2h_ш)-Zb_z}{2(Z+\pi)}; \qquad (3.18)$$

меньший радиус

$$r_2 = \frac{\pi(D-2h_п)-Zb_Z}{2(Z-\pi)}; \qquad (3.19)$$

расстояние h_1

$$h_1 = h_п - h_ш - r_1 - r_2; \qquad (3.20)$$

площадь паза в штампе

$$S_п = \frac{\pi}{2}(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2)h_1; \quad (3.21)$$

площадь сечения пазовой изоляции

$$S_{из} = b_{из}(2\pi r_1 + \pi r_2 + 2h_1); \qquad (3.22)$$

площадь пазового клина и изоляционной прокладки между слоями обмотки

$$S_к = (3 \div 5)r_1; \qquad (3.23)$$

площадь поперечного сечения паза, заполненная обмоткой,

$$S_{п.о.} = S_п - S_{из} - S_к; \qquad (3.24)$$

площадь поперечного сечения обмотки, уложенной в один паз,

$$S_0 = \frac{2{d_{из}}^2 n_{эл} u_п w_c}{k_з}, \qquad (3.25)$$

где $d_{из}$ — диаметр одного изолированного провода; $n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном проводнике; w_c— число витков в секции; $u_п$— число секционных сторон в пазу; $k_з$— коэффициент заполнения паза изолированными проводниками: $k_з$= 0,68÷0,72.

Если площадь поперечного сечения паза $S_{п.о.}$ больше площади поперечного сечения обмотки S_0, то необходимо выбрать проводники большего диаметра и снизить плотность тока J_a обмотки якоря.

Если $S_0 > S_{п.о.}$, требуется увеличить плотность тока и выбрать проводники меньшего сечения, чтобы обеспечить коэффициент заполнения паза $k_з$ не более 0,72.

Средняя длина полувитка секций обмотки якоря с овальными пазами и всыпными обмотками, м,

$$l_{a.\text{ср}} = l_{\text{л}} + l_{\text{п}}, \qquad (3.26)$$

где $l_{\text{л}}$ — длина лобовой части, м; $l_{\text{п}}$— длина якоря, м.

Средняя длина лобовой части:

при $2p = 2$

$$l_{\text{л}} = 0{,}9\tau; \qquad (3.27)$$

при $2p = 4$

$$l_{\text{л}} = (1{,}2 \div 1{,}3)\tau. \qquad (3.28)$$

Сопротивление обмотки якоря, Ом,

$$R_a = \rho_\vartheta \frac{N l_{a.\text{ср}}}{(2a)^2 q_a}, \qquad (3.29)$$

где ρ_ϑ — удельное сопротивление меди при расчетной рабочей температуре (см.табл.3.14), q_a — поперечное сечение эффективного проводника, м^2.

Масса меди, кг,

$$m_{Ma} = 8900 l_{a.\text{ср}} N q_a. \qquad (3.30)$$

Прямоугольные пазы якоря. При прямоугольной форме паза (рис. 3.18) предварительно задаются высотой паза $h_{\text{п}}$. Ширина зубца в минимальном сечении b_{Z3} (у основания паза) определяется допустимой индукцией B_{Zmax}, значения которой можно принять по табл. 3.15.

Якоря МПТ общего назначения с прямоугольными пазами при диаметрах свыше 200 мм имеют аксиальные вентиляционные каналы. При диаметрах до 300 мм достаточно выполнить один ряд каналов диаметром от 15 до 22 мм при числе каналов от 18 до 25.

При диаметрах от 300 мм до 500 мм выполняют два ряда каналов диаметром от 24 до 34 мм с числом каналов от 24 до 30.

При диаметрах якоря до 500 мм пакет магнитопровода насаживают непосредственно на вал. Внутренний диаметр сердечника в этом случае принимают ориентировочно равным $D_0 \approx 0{,}3D$ или рассчитывают по формуле (3.17).

Размеры паза $h_{\text{п}}$ и $b_{\text{п}}$ и спинки якоря h_j уточняют после проверки индукции в спинке якоря B_j, которая не должна превышать предельных значений, приведенных в табл. 3.12.

Таблица 3.14. Удельные электрические сопротивления материала проводников обмоток

Тип обмотки	Материал	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре, ° С		
		20	75	115
Обмотка из медных обмоточных проводов или неизолированной медной проволоки или шины	Медь	$\frac{1}{57}\cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{47}\cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{41}\cdot 10^{-6}$
Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей	Алюминиевые шины	$\frac{1}{35}\cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{28}\cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{26}\cdot 10^{-6}$
	Алюминий литой	$\frac{1}{30}\cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{14}\cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{22}\cdot 10^{-6}$

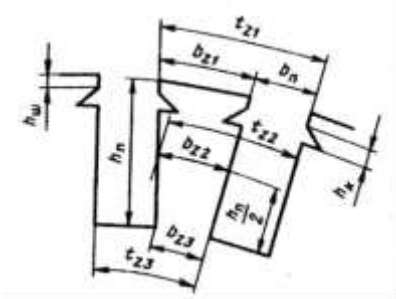


Рис. 3.18. Размеры пазов прямоугольной формы

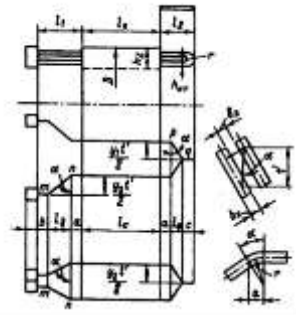


Рис. 3.19. К расчету и проектированию секций обмоток якоря

При креплении обмоток в пазах якоря клиньями высота клина $h_к$ принимается приблизительно 4 мм, высота шлица $h_ш$ = 1 мм.

После выбора размеров паза и зубца определяется максимальная ширина проводника с изоляцией:

$$b_{пр} = \frac{b_п - b_{из}}{u_п} \qquad (3.31)$$

При скосах пазов на одно или половину зубцового деления расчетную ширину паза в формуле 3.31 необходимо уменьшить на 0,1 мм.

Таблица 3.15. **Значения допустимой индукции**

Исполнение двигателей по степени защиты и способу и охлаждения	Магнитная индукция B_{Zmax}, Тл при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	25 и ниже
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,9÷2,1	2÷2,2	2,1÷2,3	2,2÷2,4
IP44, IC0141	1,6÷1,8	1,7÷1,9	1,8÷2	1,9÷2,1
IP44, IC0041	1,5÷1,7	1,6÷1,8	1,7÷1,9	1,8÷2

Предельно допустимые значения высоты проводника с изоляцией равны:

$$a_{\text{пр}} = \frac{h_{\text{п}} - h_{\text{из}} - h_{\text{п}}}{2w_{\text{с}}} \qquad (3.32)$$

где $w_{\text{с}}$— число витков в секции.

Для уменьшения эффекта вытеснения тока в проводниках обмотки якоря, вращающегося в магнитном поле, принимается высота элементарного проводника не более 4 мм при $f \geq 100$ Гц, 7 мм при $f \approx 50$ Гц, 10 мм при $f \leq 25$ Гц. В этом случае допускается разделить эффективный проводник по высоте на два элементарных проводника, каждый из которых имеет высоту, не превышающую допустимый размер по высоте для данной частоты.

По размерам $a_{\text{пр}} \times b_{\text{пр}}$ необходимо выбрать по табл. П.2.2 (приложение 2).

Обмотки якорей с прямоугольными пазами выполняют из проводников прямоугольного сечения марки ПЭТВП при классе нагревостойкости изоляции В и ПЭТП-155 при классе нагревостойкости изоляции F.

Все типы двигателей серии 4П выполняют с изоляцией класса нагревостойкости F.

Если провода имеют круглое сечение, то при классах нагревостойкости изоляции В выбирают марку ПСД, при классе нагревостойкости Н — ПСДК.

После проверки размещения всех проводников обмотки якоря в пазу с учетом клина, пазовой и витковой изоляций уточняют размеры паза, которые округляют до ближайшей большей десятой миллиметра.

По выбранному сечению проводника определяют плотность тока, А/м^2,

$$J_a = \frac{I_a}{q_a} \qquad (3.33)$$

и произведение AJ_a, $А^2/м^3$.

Полученное значение произведения AJ_a необходимо сравнить с рекомендованными (см. рис. 3.15). Если, AJ_a превышает допустимые значения, то необходимо увеличить площадь паза и, повторив расчет зубцовой зоны и размеров проводников, установить окончательные размеры паза.

Размеры секций обмотки якоря определяют по чертежу пакета якоря и обмоточным данным (рис. 3.19).

Длины переднего l_1 и заднего l_2 вылетов секции равны:

$$l_1 = l_3 + a + b;$$
$$l_2 = l_4 + a + c,$$

где *a* — прямолинейный участок секции с учетом радиуса изгиба; в зависимости от напряжения значение *a* равно:

U, В	250	500	750	1500
a, м	0,013	0,015	0,019	0,025

b - прямолинейный участок концов секции, который при перекрученных проводниках секции равен 0,015÷0,02 м, при расплющенных концах секции 0,04 м, при выполнении секции без скрутки проводников 0,012÷0,015 м;

c — прямолинейные участки лобовых частей передней части секции (с учетом радиуса изгиба):

$$c = 0{,}004 + r + h_{кт}.$$

Прямолинейные участки лобовых частей передней части секции $mn = l_5$ и задней $pq = l_6$ равны:

$$l_5 = \frac{y_2 t_Z'}{2\cos\alpha}; \qquad l_6 = \frac{y_1 t_Z'}{2\cos\alpha} \qquad (3.34)$$

Соответственно вылеты l_3 и l_4 равны:

$$l_3 = y_2 t_Z' \frac{tg\,\alpha}{2}; \quad l_4 = y_1 t_Z' \frac{tg\,\alpha}{2} \qquad (3.35)$$

где

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon; \quad y_2 = y - y_1.$$

Шаг $t_Z{}'$ для предварительных расчетов

$$t_Z{}' = \frac{\pi(D-2h_п)}{Z} \qquad (3.36)$$

Угол α определяют согласно рис. 3.19:

$$\sin\alpha = \frac{b_л+\delta_л}{t_Z{}'} \qquad (3.37)$$

где $b_л$ — толщина катушки в лобовой части, $b_л \approx 1{,}2b_п$;
$\delta_л$ — расстояние между лобовыми частями двух соседних катушек, м:

$$\delta_л = (0{,}4 \div 10) \cdot 10^{-3}.$$

Длина полувитка обмотки якоря, м:

$$l_{aср} = l_п + 2a + l_5 + l_6 + b + c \qquad (3.38)$$

Сопротивление и массу обмотки определяют соответственно по (3.29), (3.30).

4. РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ПОД ГЛАВНЫМИ ПОЛЮСАМИ. КОМПЕНСАЦИОННАЯ ОБМОТКА

Воздушный зазор под главными полюсами является одним из главных размеров машины, хотя выбирают его часто исходя из технологических и конструктивных соображений. От размера этого зазора зависят основные характеристики машины, а также потенциальные условия коммутации на коллекторе, допустимый диапазон регулирования частоты вращения и т. д.

Поскольку в МПТ, за редким исключением, щетки устанавливаются строго по линии геометрической нейтрали, а магнитная цепь насыщена, то при расчете магнитной цепи машины рассматривают только поперечную составляющую реакции якоря и влияние ее на магнитное поле в воздушном зазоре.

Расчет размагничивающего действия поперечной реакции якоря производят по переходной характеристике $B_\delta = f(F_\delta + F_Z + F_j)$ (рис. 4.1), построенной по результатам расчета магнитной цепи (см. табл. 5.2). При нагрузке под действием поперечной реакции якоря магнитное поле в воздушном зазоре искажается: под одним краем полюса индук-

ция уменьшается, под другим возрастает. Точки d и f, отстоящие от ординаты ab на расстоянии $0{,}5Ab_p$ (где b_p — ширина полюсной дуги), определяют значения $B_{\delta min}$ и $B_{\delta max}$ под краями полюсов, а кривая daf— распределение индукции в воздушном зазоре на протяжении полюсной дуги.

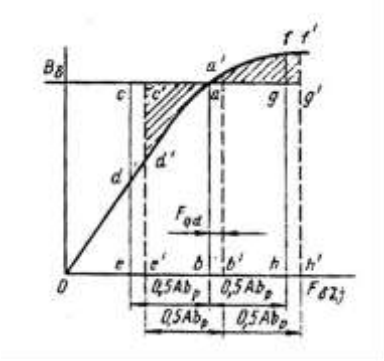


Рис. 4.1. Переходная характеристика машины постоянного тока

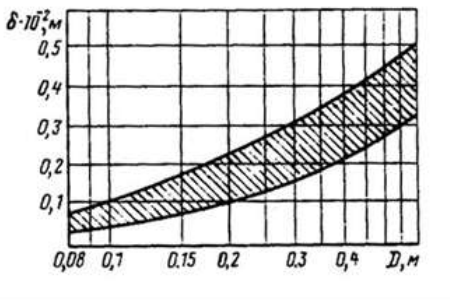


Рис. 4.2. Зависимость длины воздушного зазора от диаметра якоря

Среднее значение индукции в воздушном зазоре в этом случае можно определить по формуле:

$$B_{\delta \text{ср}} = \frac{B_{\delta min} + 4B_{\delta} + B_{\delta max}}{6} \qquad (4.1)$$

где B_{δ} — индукция в воздушном зазоре в режиме холостого хода.

Для определения МДС размагничивания поперечной реакции якоря F_{qd} необходимо ось ab криволинейного четырехугольника $edafh$ сместить по оси $F_{\delta Zj}$ на отрезок bb'. В масштабе МДС этот отрезок определяет размагничивающее действие реакции якоря.

Как видно из рис. 4.1, поперечная реакция якоря нарастает от середины полюсной дуги к его краям. При значительной поперечной реакции якоря может произойти опрокидывание поля под одним краем полюса: точка d сместится по кривой индукции в область отрицательных значений B_{δ}.

Так как поле реакции якоря замыкается по контуру — зубцы якоря, спинка якоря, воздушный зазор, полюсный наконечник, то воздушный зазор выбирают таким, чтобы индукция B_{δ} на протяжении всей полюсной дуги не изменяла своего направления. Обычно это условие выполняется на всех рабочих диапазонах изменения тока якоря и индукции в

воздушном зазоре, если воздушный зазор δ находится в пределах, указанных на рис. 4.2.

В целях снижения реакции якоря под краями полюсов воздушный зазор может выполняться эксцентричным или с приподнятыми краями полюсов (рис. 4.3). В этом случае воздушный зазор может быть рассчитан по формуле

$$\delta_{\text{расч}} = k\delta_1 \quad (4.2)$$

где $k = \dfrac{\sqrt{\frac{\delta_2}{\delta_1}-1}}{arctg\sqrt{\frac{\delta_2}{\delta_1}-1}}$ — коэффициент приведения неравномерного воздушного зазора, имеющего размер δ_1 под серединой полюса и δ_2 под краем полюсного наконечника. Обычно $\delta_2 \approx (1{,}5 \div 1{,}6)\delta_1$.

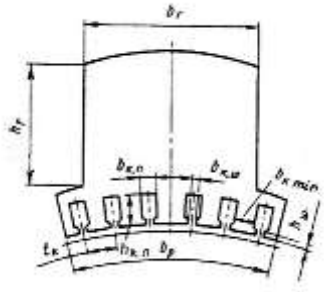


Рис. 4.3. Полюсный наконечник главного полюса

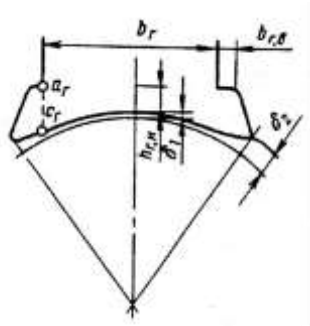


Рис. 4.4. Пазы компенсационной обмотки

В машинах серии 4П и в машинах других серий при диаметрах якоря свыше 300 мм, а также в машинах с широким диапазоном регулирования частоты вращения и большой кратностью перегрузок для компенсации поперечной реакции якоря в зоне полюсной дуги применяют компенсационную обмотку.

Конструктивно компенсационную обмотку выполняют в виде однослойной катушечной, а в крупных машинах — в виде стержневой обмотки и укладывают в пазы наконечников главных полюсов (рис. 4.4) или в пазы статора в машинах серии 4П.

Схема выполнения компенсационной обмотки приведена на рис. 4.5, где буквами *N* и *S* обозначена полярность добавочных полюсов.

При расчете компенсационной обмотки обычно принимают ее МДС в зоне полюсной дуги в пределах

$$0{,}85A\frac{b_p}{2} < F_к < 1{,}15A\frac{b_p}{2} \qquad (4.3)$$

Компенсационную обмотку соединяют последовательно с обмоткой якоря, что создает автоматическую компенсацию реакции якоря при любом токе нагрузки.

Во избежание вибраций магнитного происхождения зубцовый шаг по полюсному наконечнику $t_к$ (см. рис. 4.4) должен отличаться от зубцового шага t_{Z1} по якорю. Это условие обычно выполняется, если число пазов компенсационной обмотки находится в пределах

$$Z_к = (0{,}85 \div 1{,}15)\frac{Z}{2p}\alpha_\delta \qquad (4.4)$$

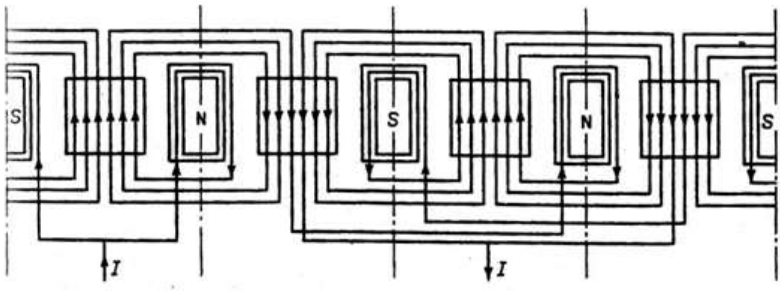


Рис. 4.5. Схема выполнения компенсационной обмотки

Число зубцов $Z_к$ должно быть четным. Выбор числа зубцов $Z_к$ и расчет зубцовой зоны компенсационной обмотки производят в следующем порядке:

Определяют число проводников компенсационной обмотки на один полюс:

$$N_к = \frac{Ab_p a_к}{I} \qquad (4.5)$$

где $a_к$ — число параллельных ветвей компенсационной обмотки;

I — ток якоря, А.

Число параллельных ветвей $a_к$ принимают равным единице при токе якоря до 2000 А. Если ток в пазу компенсационной обмотки превышает 2000 А, то ее выполняют в две параллельные ветви: $a_к = 2$.

Выбирая Z_K в диапазоне от 6 до 12, определяют шаг $t_к$, ширину зубца $b_{Zк} = \frac{t_к B_\delta \sigma_г}{B_{Zк} k_c}$ где $\sigma_г = 1{,}05$ — коэффициент рассеяния главного

полюса; $B_{Z\text{к}} = 1{,}6 \div 1{,}8$ Тл — индукция в минимальном сечении зубца компенсационной обмотки.

Ширина паза в свету равна:

$$b_{\text{п}} = t_{\text{к}} - b_{Z\text{к}min} \qquad (4.6)$$

При выбранном числе пазов $Z_{\text{к}}$ определяют число проводников обмотки в одном пазу:

$$n_{\text{к}} = \frac{N_{\text{к}}}{Z_{\text{к}}} \qquad (4.7)$$

Число $n_{\text{к}}$ округляют до ближайшего целого числа.

Площадь поперечного сечения проводника компенсационной обмотки

$$q_{\text{к}} = \frac{I}{a_{\text{к}} J_{\text{к}}} \qquad (4.8)$$

где $J_{\text{к}}$ — плотность тока в компенсационной обмотке.

В зависимости от класса нагревостойкости изоляции плотность тока $J_{\text{к}}$ принимают равной $(4{,}7 \div 5{,}2) \cdot 10^6$ А/м^2 для класса B, $(5{,}3 \div 5{,}8) \cdot 10^6$ А/м^2 для класса F и $(6{,}0 \div 6{,}6) \cdot 10^6$ А/м^2 для класса H.

При числе проводников в пазу более двух компенсационную обмотку выполняют катушечной с укладкой в открытые пазы. В этом случае проводники размещают в зависимости от выбранных размеров элементарного проводника либо меньшей, либо большей стороной по ширине паза. Стороны катушечных групп могут укладываться как в один, так и в два ряда по ширине паза (рис. 4.6, *а—в*). При числе проводников в пазу $n_{\text{к}} = 1$ или *2* (рис. 4.6, *г, д*) обмотку выполняют стержневой. Стержневые обмотки из неизолированной шинной меди изолируют и вставляют с торца в полузакрытые пазы, ширину шлица паза принимают равной 2÷3 мм. В лобовых частях стержни соединяют дугами из неизолированной шинной меди.

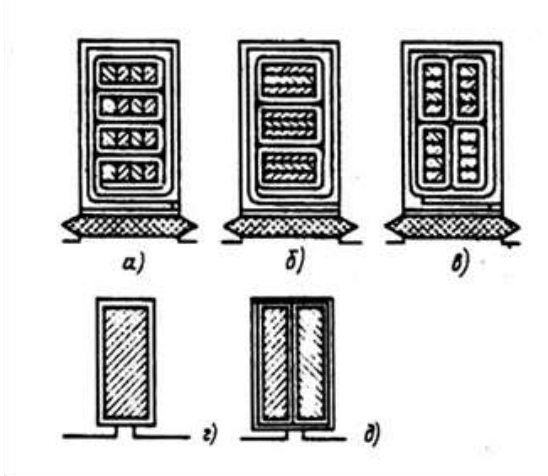


Рис. 4.6. Укладка проводников в пазы компенсационной обмотки

Конструкция изоляции компенсационных обмоток в пазу и лобовых частях приведена в табл. 4.1—4.3.

После выбора стандартных размеров проводника, схемы размещения проводников в пазу и класса нагревостойкости изоляции обмотки окончательно рассчитывают размеры пазов, уточняют степень компенсации:

$$k_{\text{к}} = \frac{N_{\text{к}} I}{a_{\text{к}} b_p A} \qquad (4.9)$$

Коэффициент $k_{\text{к}}$, должен находиться в пределах 0,85 ÷ 1,15.

Высота клина принимается равной $h_{\text{к}}$= *2,5* мм, высота шлица $h_{\text{ш}}$= *1,0* мм.

Средняя ширина катушки компенсационной обмотки, м,

$$b_{\text{к.кат.ср}} = \frac{\pi(D_{\text{г}}+h_{\text{к}})}{2p} - \frac{b_p}{2}\frac{(D_{\text{г}}+h_{\text{к}})}{D_{\text{г}}} \qquad (4.10)$$

где $D_{\text{г}}$— диаметр внутренней поверхности главного полюса;

$h_{\text{к}}$ — высота паза компенсационной обмотки;

b_p — ширина полюсного наконечника.

Средняя длина лобовой части компенсационной обмотки, м,

$$l_{\text{к.л}} = 1{,}2 b_{\text{к.кат.ср}} \qquad (4.11)$$

Средняя длина прямолинейной части катушки компенсационной обмотки, м,

$$l_{к.п} = l_{п} + 2b_{к.л} \qquad (4.12)$$

где $b_{к.л}$— средняя длина прямолинейного участка компенсационной обмотки от торца полюсного наконечника до радиуса закругления: $b_{к.л}$= *0,05* м при стержневой обмотке и $b_{к.л}$ = *0,03* м при катушечной обмотке.

Средняя длина полувитка обмотки, м,

$$l_{к.ср} = l_{к.л} + l_{к.п} \qquad (4.13)$$

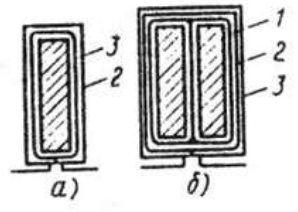
Сопротивление компенсационной обмотки, Ом,

$$R_{к} = \rho_{\vartheta} \frac{N_{к} l_{к.ср} 2p}{a_{к}{}^{2} q_{к}} \qquad (4.14)$$

Масса меди компенсационной обмотки, кг,

$$m_{к} = 8900 l_{к.ср} N_{к} 2pq_{к} \qquad (4.15)$$

Таблица 4.1. **Изоляция компенсационной обмотки машин постоянного тока** (пазы прямоугольные полузакрытые, обмотка однослойная стержневая, h = 355÷500 мм, напряжение до 1000 В)



Позиция	Материал			Число слоев			Двусторонняя толщина изоляции			
	Наименование, марка		Толщина, мм				Рисунок *а*		Рисунок *б*	
	Класс нагревостойкости		Класс нагревостойкости	Класс нагревостойкости			по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
	B	F H	B F H	B	F	H				
1	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-994-ТП	Полиимидная пленка ПМ	0,1 0,1 0,05	1 вполнахлеста		2 вполвполнахлеста	—	—	0,8	0,8
2	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F Синтофолий H	0,15 0,16 0,16	4,5 оборота	3,5 оборота	3,5 оборота	1,1	1,1	1,1	1,1
3	Лакоткань-неслюдопласт ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	Фенилоновая бумага	0,15 0,15 0,15	1	1	1	0,3	0,3	0,3	0,3
—	Допуск на укладку обмотки						0,2	0,4	0,3	0,4
—	Общая толщина изоляции в пазу						1,6	1,8	2,5	2,6

Таблица 4.2. **Изоляция компенсационной обмотки двигателей постоянного тока** (пазы прямоугольные открытые, обмотка однослойная секционная из неизолированных проводов, $h=355 \div 500$ мм, напряжение до 1000 В, изоляция класса нагревостойкости В)

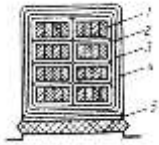
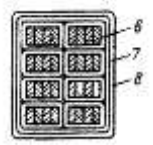
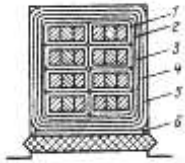
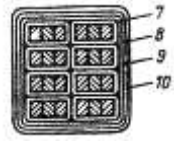
Часть обмотки	Позиция на рис.	Материал		Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине при $u_{\text{п.шир}}$		по высоте при $u_{\text{п.выс}}$		
					1	2	2	3	4
Пазовая 	*1*	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12	1,12	1,68	2,24
	2	Тоже	0,14	То же	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	3	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	4	Стеклолакоткань	0,15	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	5	Стеклотекстолит	0,5	1	—	—	0,5	0,5	0,5
	—	Разбухание от пропитки	—	—	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки	—	—	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без высоты клина)			2,22	2,78	3,68	4,24	4,8
Лобовая 	*6*	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12	1,12	1,68	2,24
	7	Тоже	0,14	Тоже	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	8	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	—	Общая толщина изоляции секции в лобовой части			1,32	1,88	1,88	2,44	3

Таблица 4.3. **Изоляция компенсационной обмотки машин постоянного тока** (пазы прямоугольные открытые, обмотка однослойная секционная из неизолированных проводов, $h = 355 \div 500$ мм, напряжение до 1000 В)

Часть обмотки	Позиция на рис.	Материал: Наименование, марка / Класс нагревостойкости F	Материал: Класс нагревостойкости H	Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине при $u_{п.шир}$		по высоте при $u_{п.выс}$		
						1	2	2	3	4
Пазовая 	*1*	Фенилоновая бумага		0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	2	Полиимидная пленка ПМ		0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	3	Фенилоновая бумага		0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	4	Стеклянная лента ЛЭС		0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	5	Фенилоновая бумага		0,2	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	6	Стеклотекстолит		0,5	1	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
		СТЭФ	СТК			—	—	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки		—	—	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Общая изоляция в пазу (без высоты клина)		—	—	2,5	2,9	3,6	4,0	4,4
Лобовая 	*7*	Фенилоновая бумага		0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	8	Полиимидная пленка ПМ		0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	9	Фенилоновая бумага		0,05	вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	10	Стеклянная лента ЛЭС		0,1	Тоже	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции секции в лобовой части		—	—	1,8	2,2	2,2	2,6	

5. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Магнитная система МПТ представляет собой $2p$ симметричных магнитных цепей (рис. 5.1), каждая из которых состоит из семи последовательно соединенных условно однородных участков: воздушного зазора под главными полюсами, зубцов якоря, ярма якоря, зубцов полюсных наконечников главных полюсов (у компенсированных машин), сердечника главного полюса, зазора между главным полюсом и станиной.

Замкнутый контур магнитных линий пары полюсов является симметричным относительно оси геометрической нейтрали, поэтому расчет магнитной цепи МПТ достаточно производить на один полюс.

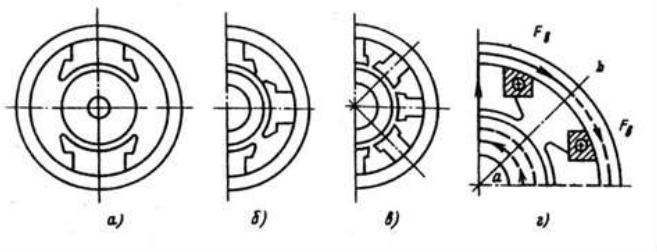


Рис. 5.1. Магнитные системы (*а*—*в*) и магнитная цепь (*г*) машин постоянного тока

Для расчета магнитной цепи необходимо знать размеры всех участков магнитопровода, площади их сечения, магнитные потоки этих участков. Эти данные для МПТ приведены в табл. 5.1. Коэффициенты, приведенные в этой таблице, рассчитывают следующим образом.

1. Коэффициент воздушного зазора k_δ, учитывающий влияние зубчатости якоря $k_{\delta a}$, зубцов компенсационной обмотки на главном полюсе $k_{\delta к}$, бандажных канавок $k_{\sigma к}$ и радиальных вентиляционных каналов $k_{в.к}$ на магнитное сопротивление воздушного зазора, равен:

$$k_\delta = k_{\delta a} k_{\delta к} k_{\sigma к} k_{в.к} \qquad (5.1)$$

где

$$k_{\delta a} = 1 + \frac{b_ш}{t_{Z1} - b_ш + 10\delta} \qquad (5.2\ а)$$

или

$$k_{\delta a} = \frac{t_{Z1} + 10\delta}{t_{Z1} - b_ш + 10\delta} \qquad (5.2\ б)$$

$b_ш$ и t_{Z1} — по рис. 3.16; при прямоугольных пазах (см. рис. 3.18) вместо $b_ш$ вводится $b_п$.

$$k_{\delta к} = 1 + \frac{b_{к.ш}}{t_к - b_{ш.к} + \frac{5\delta t_к}{b_{к.ш}}} \qquad (5.3)$$

$b_{к.ш}$ и $t_к$ — по рис. 4.3.

При бандажах из немагнитного материала

$$k_{\sigma к} = 1 + \frac{b_\sigma h_\sigma}{l_a(\delta + h_\sigma) - b_\sigma h_\sigma} \qquad (5.4\ а)$$

где b_σ — общая ширина бандажных канавок на якоре; h_σ — глубина бандажных канавок; l_a — длина якоря.

При бандажах из магнитной проволоки

$$k_{\sigma к} = 1 + \frac{b_\sigma (h_\sigma + 0{,}8d)}{l_a(\delta + h_\sigma - 0{,}8d) - b_\sigma (h_\sigma - 0{,}8d)} \qquad (5.4\ б)$$

где d — диаметр бандажной проволоки.

Размеры и число бандажных канавок определяются предварительно и уточняются после механического расчета бандажа (см. §12).

Коэффициент

$$k_{в.к} = 1 + \frac{3\delta}{l_п + 3\delta(1 + l_п / b_{в.к})} \qquad (5.5)$$

где $l_п$ — длина пакета; $b_{в.к}$ — ширина вентиляционного канала.

2. Расчетная ширина полюсной дуги $b_p{}' = b_p$ при эксцентричном зазоре под главными полюсами и $b_p{}' = b_p + 2\delta$ при концентрическом зазоре под главными полюсами с компенсационной обмоткой.

3. Расчетная длина якоря l_δ равна длине пакета якоря $l_п$, т. е. $l_\delta = l_a$ при отсутствии радиальных вентиляционных каналов и $l_\delta = l_п - n_к b_{в.к}$ при наличии $n_к$ радиальных вентиляционных каналов шириной $b_{в.к}$ каждого канала.

4. Расчетная длина станины l_c для МПТ может быть принята:

$$l_c = l_г + 0{,}4D \qquad (5.6)$$

где $l_г$ — длина главного полюса.

5. Высоту главного полюса $h_г$ для МПТ с диаметром якоря до 0,5 м предварительно можно определить по рис. 5.2. При D > 0,5 м для предварительного определения высоты полюса необходимо использовать установленные зависимости $D_{вн} = f(D; p)$, приведенные на рис. 2.1.

Таблица 5.1. **Данные для расчета магнитной цепи**

Участок магнитной цепи	Расчетная длина участка, м	Площадь сечения участка, м^2	Магнитный поток при нормальном режиме, Вб	Индукция в сечении участка, Тл
Воздушный зазор под главным полюсом	$L_\delta = k_\delta \delta$	$S_\delta = b_p' l_\delta = \alpha \tau l_\delta$	$\Phi_{\delta н} = \frac{60 a E_н}{n_н p N}$	$B_{\delta н}$
Зубцы якоря овальной формы (см. рис. 3.16)	$L_Z = h_п - 0{,}2 r_1$	$S_Z = \frac{Z \alpha_\delta b_Z l_\delta k_c}{2p}$	$\Phi_{\delta н}$	$B_Z = \frac{\Phi_{\delta н}}{S_Z}$
Зубцы якоря прямоугольной формы (см. рис. 3.18)	$L_Z = h_п$	$S_Z = \frac{\pi \alpha_\delta l_\delta}{2p}(D - 2h_п - Z b_п) k_c$	$\Phi_{\delta н}$	$B_Z = \frac{\Phi_{\delta н}}{S_Z}$
Ярмо якоря	$L_j = \frac{\pi(D_0 - h_j)}{4p} + \frac{h_j}{2}$	$S_j = l(h_j - 2/3d) k_c$	$\Phi_{\delta н}$	$B_j = \frac{\Phi_{\delta н}}{2 S_j}$
Зубцы наконечника главного полюса (см. рис. 4.3) с компенсационной обмоткой	$L_{к.п} = h_{к.п}$	$S_{к.п} = (b_p - Z_к b_{к.п}) l_г k_c$	$\sigma_г \Phi_{\delta н}$	$B_к = \frac{\Phi_{\delta н} \sigma_г}{S_{к.п}}$
Сердечник главного полюса (см. рис. 4.4,4.3)	$L_г = h_г$	$S_г = l_г b_г k_c$	$\sigma_г \Phi_{\delta н}$	$B_г = \frac{\Phi_{\delta н} \sigma_г}{S_г}$
Зазор между главным полюсом и станиной	$L_{с.п} = \delta_{с.п} = 2 l_г \cdot 10^{-4} + 10^{-4}$	$S_{с.п} = S_г$	$\sigma_г \Phi_{\delta н}$	$B_{с.п} = \frac{\Phi_{\delta н} \sigma_г}{S_{с.п}}$
Станина	$L_с = \frac{\pi(D_{в.н} + b_c)}{4p} + \frac{b_с}{2}$	$S_c = Z_c h_c$	$\sigma_г \frac{\Phi_{\delta н}}{2}$	$B_с = \frac{\Phi_{\delta н} \sigma_г}{2 S_с}$

6. Высота станины h_c определяется при известных радиальных размерах магнитной системы:

$$h_c = \frac{D_{вн} - (D + 2\delta)}{2} - h_г - h_{г.н} \qquad (5.7)$$

где $h_{г.н}$ — высота наконечника главного полюса (см. рис. 4.4), выбирается исходя из условия, чтобы магнитная индукция в сечении $a_г c_г$ не превышала 1,8÷1,9 Тл; индукция в станине из массивной стали не должна превышать B_c = 1,3 Тл (1,05 Тл при классе изоляции Н). Увеличение магнитной индукции сверх установленных значении приводит, в первую очередь, к ухудшению коммутации машины.

Таблица 5.2. **Расчет характеристики намагничивания машины**

№ п/п	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	0,5× $\Phi_{\delta н}$	0,75 × $\Phi_{\delta н}$	0,9× $\Phi_{\delta н}$	$\Phi_{\delta н}$	1,1× $\Phi_{\delta н}$	1,15 × $\Phi_{\delta н}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Магнитный поток	Φ_δ	Вб						
2	ЭДС	$E = \frac{pN}{60a}\Phi_\delta n_н$	В						
3	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\alpha_\delta \tau l_\delta}$	Тл						
4	МДС воздушного зазора	$F_\delta = 0{,}8 B_\delta L_\delta \cdot 10^6$	А						
5	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_{Z1} = k_{Z1}B_\delta$ $B_{Z2} = k_{Z2}B_\delta$ $B_{Z3} = k_{Z3}B_\delta$	Тл Тл Тл						
6	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря	H_{Z1} H_{Z2} H_{Z3} (по приложению 3)	А/м А/м А/м						
7	Средняя напряженность магнитного поля в зубцах	$H_{Zср} = \frac{H_{Z1} + 4H_{Z2} + H_{Z3}}{6}$	А/м						
8	Магнитное напряжение	$F_Z = L_Z H_{Zср}$	А						
9	Магнитная индукция в спинке якоря	$B_j = \frac{\Phi_\delta}{2S_j}$	Тл						
10	Напряженность магнитного поля в спинке якоря	H_j (по приложению 3)	А/м						
11	Магнитное напряжение спинки якоря	$F_j = L_j H_j$	А						
12	Магнитный поток главного полюса	$\Phi_г = \sigma_г \Phi_\delta$	Вб						
13	Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	$B_г = \frac{\Phi_г}{s_г}$	Тл						

продолжение табл.5.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14	Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса	$H_{\text{г}}$	А/м						
15	Магнитное напряжение сердечника главного полюса	$F_{\text{г}} = L_{\text{г}} H_{\text{г}}$	А						
16	Магнитная индукция в зубцах наконечника главного полюса (компенсационной обмотки)	$B_{Z\text{к}} = \frac{\sigma_{\text{г}} \Phi_{\delta}}{S_{\text{к.п}}}$	Тл						
17	Напряженность магнитного поля в зубцах компенсационной обмотки	$H_{Z\text{к}}$	А/м						
18	Магнитное напряжение зубцов наконечника главного полюса	$F_{Z\text{к}} = L_{\text{к.п}} H_{Z\text{к}}$	А						
19	Магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной	$B_{\text{с.п}} = B_{\text{г}}$	Тл						
20	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и главным полюсом	$F_{\text{с.п}} = 0{,}8 L_{\text{с.п}} B_{\text{г}} \cdot 10^{6}$	А						
21	Магнитная индукция в станине	$B_{c} = \frac{\sigma_{\text{г}} \Phi_{\delta}}{2 S_{c}}$	Тл						
22	Напряженность магнитного поля в станине	H_{c}	А/м						

продолжение табл.5.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23	Магнитное напряжение станины	$F_c = L_c H_c$	А						
24	Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи	$F_\Sigma = F_\delta + F_Z + F_j + F_г + F_{Zк} + F_{с.п} + F_c$	А						
25	Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя	$F_{\delta Zj} = F_\delta + F_Z + F_j$	А						

Примечание. При определении магнитного напряжения зубцового слоя следует определить напряженность магнитного поля по кривым приложения 3, которые построены при $B_Z > 1{,}8$ Тл с учетом вытеснения магнитного поля в паз.

Для открытых пазов (см. рис. 3.18):

$k_{Z1} = \frac{t_{Z1} l_\delta}{b_{Z1} l_a k_c}$; $k_{Z2} = \frac{t_{Z2} l_\delta}{b_{Z2} l_a k_c}$; $k_{Z3} = \frac{t_{Z3} l_\delta}{b_{Z3} l_a k_c}$;

для овальных пазов (см рис. 3.16):

$k_{Z1} = \frac{t_{Z1} l_\delta}{b_{Z1} l_a k_c}$; $k_{Z2} = \frac{t_{Z2} l_\delta}{b_Z l_a k_c}$; $k_{Z3} = \frac{t_{Z3} l_\delta}{b_Z l_a k_c}$.

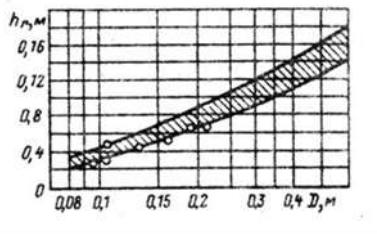


Рис. 5.2. К определению высоты главного полюса

7. Ширина выступа наконечника главного полюса $b_{г.в}$ может быть принята равной $(0{,}1 \ldots 0{,}15) b_г$.

Ширина сердечника главного полюса

$$b_г = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{k_c l_г B_г} \qquad (5.58)$$

где $B_г$ — индукция в сердечнике главного полюса.

Для сталей марок 3411, 3412, 3413 $B_г$ = 1,6÷1,7 Тл, для сталей марок 1211 и 1212 $B_г$ = 1,35÷1,55 Тл. При исполнении машины по степени защиты IP44 и способам охлаждения IC0141 и IC0041 индукция $B_г$ должна быть снижена на 0,2÷0,3 Тл.

8. Коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов $\sigma_г$ зависит от воздушного зазора, ширины межполюсного окна $\tau - b_p$ и ширины полюсного наконечника добавочного полюса.

В каждом конкретном случае путем моделирования магнитного поля в воздушном зазоре можно определить $\sigma_г$.

При расчетах магнитных цепей МПТ можно принять $\sigma_г$ = 1,15 для двухполюсных машин, $\sigma_г$ = 1,2 для четырехполюсных машин без компенсационной обмотки, $\sigma_г$ = 1,25 при $2p$ = 4 и 6 и наличии компенсационной обмотки.

Для построения характеристики намагничивания МПТ необходимо определить сумму МДС всех участков магнитной цепи при значениях магнитного потока в воздушном зазоре Φ_δ = 0,5; 0,75; 0,9; 1,1 и 1,15 $\Phi_{\delta н}$.

Расчет характеристики намагничивания производится по приведенной в табл. 5.2 форме.

По данным табл. 5.2 строят характеристику намагничивания МПТ $B_\delta = f(F_\Sigma)$ и переходную характеристику $B_\delta = f(F_{\delta Zj})$.

6. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Магнитодвижущая сила обмоток параллельного или независимого возбуждения на один полюс при нагрузке, А,

$$F_в = F_\Sigma + F_{qd} \pm F_d - F_c \qquad (6.1)$$

где F_d — продольная составляющая реакции якоря, возникающая при сдвиге щеток с геометрической нейтрали на относительную дугу *x:* $F_d = 2Ax;$

F_c — МДС стабилизирующей обмотки;

F_{qd} — размагничивающее действие поперечной реакции якоря.

При компенсации реакции якоря компенсационной обмотки составляющая F_{qd} принимается равной нулю.

Конструкции изоляции и крепления обмоток главных полюсов приведены в табл. 1.2, 1.3.

Средняя длина витка обмотки главного полюса (рис. 6.1), м,

$$l_{в.ср} = 2(l_г + b_г) + \pi(b_{кт.г} + 2 \cdot \Delta_{из}) \qquad (6.2)$$

где $\Delta_{из}$ — толщина изоляции катушки по табл. 1.2, 1.3 плюс односторонний зазор между катушкой и полюсом, который принимается равным $(0{,}5 \div 0{,}8) \cdot 10^{-3}$ м при диаметрах якоря до 0,5 м.

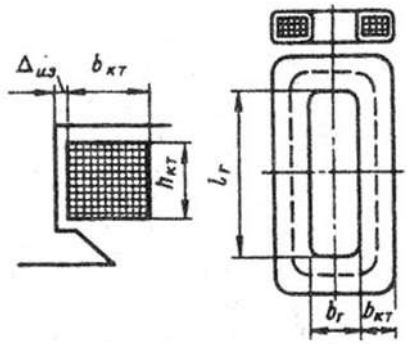


Рис. 6.1. К определению размеров катушек обмоток главных полюсов

Площадь сечения проводника обмотки при последовательном соединении катушек, м^2,

$$q_{\text{в}} = \frac{\rho_{\vartheta} k_{\text{з}} 2pF_{\text{в}} l_{\text{в.ср}}}{U_{\text{в}}} \qquad (6.3)$$

где $k_{\text{з}}$ — коэффициент запаса МДС обмотки возбуждения: $k_{\text{з}}$= 1,1÷1,2.

Марка и размеры проводов обмоток возбуждения выбираются в соответствии с табл. 6.1.

Таблица 6.1. **Марка и размеры проводов обмоток возбуждения**

Сечение, м^2	Марка провода	Тип обмотки
Менее $8 \cdot 10^{-6}$	ПЭТВ, ПЭТ-155, ПСД, ПСДК	Многослойная катушка; проводники круглого сечения
$(8 \div 25) \cdot 10^{-6}$	ПЭТВП, ПЭТП-155, ПСД, ПСДК	Многослойная катушка; проводники прямоугольного сечения с отношением сторон 1,4 ÷1,8
Более $25 \cdot 10^{-6}$	Голая шинная медь	Однослойная по ширине катушка с намоткой меди на ребро

Многослойные катушки из проводников круглого сечения выполняют сплошными. Размеры катушек (рис. 6.1) ориентировочно могут быть приняты в зависимости от диаметра якоря:

D, м	0,09	0,106	0,110	0,132	0,156	0,180
$b_{кт} \times h_{кт}$, м	0,023×0,019	0,032×0,018	0,024×0,023	0,025×0,03	0,025×0,038	0,03×0,04

Катушки обмоток возбуждения машин с диаметром якоря свыше 0,2 м выполняют секционированными. Это увеличивает поверхность охлаждения обмоток и позволяет повысить плотность тока в обмотке возбуждения.

Проводники прямоугольного сечения и проводники из шинной меди наматываются плашмя, меньшей стороной сечения проводника по высоте катушки.

Для расчета числа витков необходимо задаться плотностью тока $J_в$ в обмотке возбуждения. Средние значения $J_в$ могут быть приняты равными $(2 \div 3) \cdot 10^6$ А/м^2 при исполнении по степени зашиты IP44 и $(4{,}5 \div 6) \cdot 10^6$ А/м^2 при исполнении по степени защиты IP22.

Число витков обмотки на один полюс

$$w_в = \frac{F_в}{J_в q_в} \qquad (6.4)$$

где $J_в q_в = I_{в.н}$ — номинальный ток возбуждения.

При укладке обмотки в межполюсном окне необходимо обеспечить воздушные промежутки между краями главных и добавочных полюсов и выступающими краями катушек и внутренней поверхностью станины не менее $(6 \div 8) \cdot 10^{-3}$ м.

Площадь сечения катушки, м^2,

$$S_{кт} = \frac{w_в {d_{из}}^2}{k_{з.в}} \qquad (6.5)$$

где $d_{из}$ — диаметр изолированного провода (при проводах прямоугольного сечения необходимо вместо $d_{из}$ ввести $a_{пр} \times b_{пр}$); $k_{з.в}$ — коэффициент заполнения, определяющий разбухание катушки.

Окончательные размеры катушек обмоток возбуждения устанавливаются после размещения в межполюсном окне главных и добавочных полюсов. Если площадь межполюсного окна не позволяет разместить обмотки, то необходимо увеличить внутренний диаметр станины.

Сопротивление обмотки возбуждения, Ом,

$$R_в = \frac{\rho_\vartheta 2 p w_в l_{в.ср}}{q_в} \qquad (6.6)$$

Масса меди параллельной обмотки, кг,

$$m_{\text{Мв}} = 19{,}6pl_{\text{в.ср}}w_{\text{в}}q_{\text{в}} \cdot 10^3 \qquad (6.7)$$

Максимальный ток обмотки возбуждения, А,

$$I_{\text{в}max} = \frac{U_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} \qquad (6.8)$$

Коэффициент запаса

$$k_{\text{з}} = \frac{I_{\text{в}max}w_{\text{в}}}{F_{\text{в}}} \qquad (6.9)$$

где $k_{\text{з}}$ должен быть не менее 1,1.

На главных полюсах машин без компенсационных обмоток параллельного или независимого возбуждения в целях повышения устойчивости работы двигателя и частичной компенсации реакции якоря выполняют стабилизирующую обмотку, которая соединяется последовательно с обмоткой якоря и обмоткой добавочных полюсов. Конструктивно стабилизирующая обмотка располагается либо у полюсного наконечника, либо между секциями катушек главных полюсов, при этом она одновременно выполняет роль дистанционной прокладки.

Плотность тока J_c стабилизирующей обмотки принимают в первом приближении равной плотности тока в обмотках главных полюсов.

Число параллельных ветвей стабилизирующей обмотки принимают равным числу ветвей компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов.

Число витков на один полюс стабилизирующей обмотки

$$w_c = \frac{F_{qd}a_{\text{д}}}{I} \qquad (6.10)$$

где F_{qd} — размагничивающее действие поперечной реакции якоря, А; I— ток якоря, А; $a_{\text{д}}$ — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов.

Полученное число витков округляют до ближайшего целого числа. Марка провода и конструкция обмотки выбираются согласно табл. 6.1.

Средняя длина витка обмотки, м,

$$l_{\text{с.ср}} = 2(l_{\text{г}} + b_{\text{г}}) + \pi(b_{\text{кт.с}} + 2\Delta_{\text{из}}) \qquad (6.11)$$

где $\Delta_{\text{из}}$ — толщина изоляции катушки согласно табл. 1.2 и 1.3 плюс односторонний зазор между катушкой и полюсом, который принимается равным $(0{,}5 \div 0{,}8) \cdot 10^{-3}$ при диаметрах якоря до 500 мм; $b_{\text{кт.с}}$ —

ширина катушки, которая определяется после выбора марки провода и размещения обмотки в межполюсном окне.

Сопротивление стабилизирующей обмотки, Ом,

$$R_{\text{с}} = \rho_{\vartheta} \frac{2pw_c l_{\text{с.ср}}}{q_c} \qquad (6.12)$$

7. РАСЧЕТ КОММУТАЦИИ

Процесс коммутации в МПТ сопровождается сложным комплексом взаимодействующих между собой электромагнитных, механических и других процессов в секции и щеточном контакте. Точный учет этих процессов представляет собой весьма сложную задачу. Поэтому в конструкции каждой машины предусматриваются конструктивные меры, позволяющие выполнить экспериментальную настройку коммутации, в частности путем изменения числа витков обмотки добавочных полюсов, регулировки воздушного зазора в цепи добавочных полюсов, подбора марки щеток и т.д.

Критерием оценки коммутации МПТ является визуальная оценка степени искрения на коллекторе. ГОСТ 183—74 устанавливает, что при номинальном режиме работы машины степень искрения не должна превышать класса $1\frac{1}{2}$. При этом уровне искрения наблюдается лишь слабое точечное искрение под большей частью электрощетки, которое, однако, не должно оказывать существенного влияния на срок службы коллекторно-щеточного узла машины.

Косвенным критерием оценки коммутационной напряженности является реактивная ЭДС $E_{\text{р}}$, которая индуктируется в замкнутой накоротко секции во время ее коммутации.

Для машин с высотой оси вращения до 200 мм ЭДС $E_{\text{р}}$ не должна превышать 2,5÷3,5 В. В машинах с высотой оси вращения до 355 мм максимально допустимая ЭДС $E_{\text{р}max}$ может достигать 5 В.

Реактивная ЭДС коммутируемой секции, В,

$$E_{\text{р}} = 2w_c l_a A v_a \lambda \cdot 10^{-6} \qquad (7.1)$$

где w_c — число витков в секции; l_a — длина якоря, м; A — линейная нагрузка, А/м; $v_a = \frac{\pi D n_{\text{н}}}{60}$ — окружная скорость якоря, м/с; λ — приведенная удельная магнитная проводимость пазового рассеяния.

Для овальных полузакрытых пазов (см. рис. 3.16)

$$\lambda = 0{,}6\frac{h_{\text{п}}}{2r_2} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} + \frac{l_{\text{л}}}{l_a} + \frac{2{,}5\cdot 10^5}{w_c l_a A v_a} \cdot \frac{a}{p} \qquad (7.2)$$

для прямоугольных пазов (см. рис. 3.18)

$$\lambda = 0{,}6\frac{h_{\text{п}}}{b_{\text{п}}} + \frac{l_{\text{л}}}{l_a} + \frac{2{,}5\cdot 10^5}{w_c l_a A v_a}\cdot\frac{a}{p} \qquad (7.3)$$

Так как активные стороны секций вступают в процесс коммутации не одновременно, а через определенные интервалы времени, зависящие от ширины щетки, коэффициента укорочения обмотки, числа секционных сторон в пазу и т. д., то расчет результирующей проводимости пазового рассеяния представляет собой довольно трудоемкую задачу.

По формулам (7.1)—(7.3) с достаточной точностью можно рассчитать ЭДС коммутации для машин общего назначения, когда диаметр якоря не превышает 300 мм, а условия коммутации не являются напряженными.

Для расчета коммутации напряженных в коммутационном отношении машин, а также машин с диаметром якоря свыше 300 мм используют зависимости, определяющие средний за период коммутации эффект взаимодействия секций, расположенных в одном пазу. В этом случае средний результирующий коэффициент удельной проводимости пазового рассеяния

$$\lambda_{\text{п}}{}' = \frac{4u'}{2y_i}\left(\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{к.д}}\right) + \lambda_{\text{л}}\frac{I_{\text{д}}}{I_a} \qquad (7.4)$$

Здесь коэффициент $4u'$ принимается по рис. 7.1;

$$\lambda_{\text{п}} = 1{,}25\frac{h_1}{3b_{\text{п}}} + \frac{h_2}{b_{\text{п}}} \qquad (7.5)$$

где размеры $h_1, h_2, b_{\text{п}}$ — по рис. 7.1,

$$\lambda_{\text{к.д}} = \frac{b_{Z1}}{2\delta_{\text{д}}} \qquad (7.6)$$

b_{Z1} — по рис. 3.18; $\delta_{\text{д}}$ — воздушный зазор под добавочным полюсом предварительно принимается $\delta_{\text{д}} \approx 0{,}02D$; $\lambda_{\text{д}} = 0{,}75$ при бандажах на лобовой части обмотки якоря из магнитной проволоки и $\lambda_{\text{д}} = 0{,}5$ при стеклобандажах и бандажах из немагнитной проволоки; y_i — относительная ширина щетки, определяющая число одновременно коммутируемых секций:

$$y_i = \frac{b_{\text{щ}}}{t_{\text{к}}} + \left(1 + \frac{a}{p}\right) \qquad (7.7)$$

где $t_к$ — коллекторное деление.

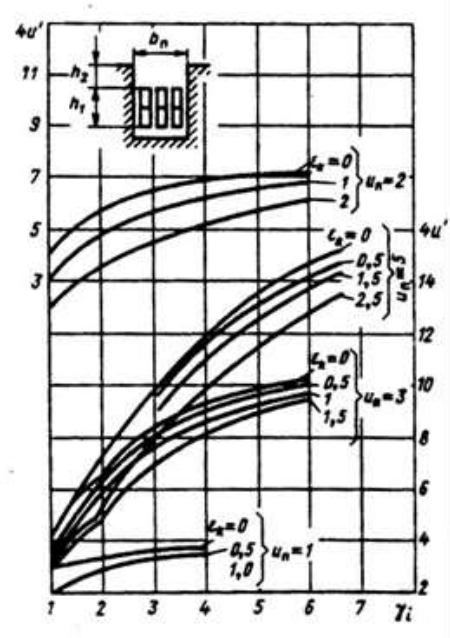


Рис. 7.1. К расчету результирующего коэффициента проводимости пазового рассеяния

При расчете λ по (7.2), (7.3) необходимо предварительно выбрать ширину щетки. Ширина щетки принимается $b_щ = (2 \div 4)t_к$ при простых волновых обмотках, $b_щ = u_п + 0{,}5$ при простых петлевых обмотках и $b_щ > 3t_к$ при двухходовых петлевых обмотках.

Ширина щетки $b_щ$ определяет ширину зоны коммутации $b_{з.к}$, т.е. ширину дуги окружности поверхности якоря, в границах которой находятся коммутируемые секции:

$$b_{з.к} = \left(\frac{b_щ}{t_к} + u_п - \frac{a}{p} + \varepsilon_к\right) t_к \frac{D}{D_к} \qquad (7.8)$$

Диаметр коллектора $D_к$ коллекторное деление $t_к$, а также $u_п$ выбирают согласно данным § 3; укорочение обмотки в коллекторных делениях $\varepsilon_к = \frac{К}{2p} - y_1$ принимают всегда со знаком плюс. Ширина щетки должна обеспечить ширину зоны коммутации:

$$b_{з.к} \le (0{,}55 \div 0{,}7)(\tau - b_p) \qquad (7.9)$$

где $\tau - b_p = b_{\text{н.з}}$ — ширина нейтральной зоны.

Верхние границы этого отношения относятся к машинам с диаметром якоря до 0,2 м, нижние значения принимаются при диаметрах якоря выше 0,4 м. При отсутствии добавочных полюсов в машинах малой мощности отношение $b_{\text{з.к}}/(\tau - b_p)$ можно выбирать в пределах 0,8÷1,25.

Принятое значение ширины щетки округляется до ближайшего стандартного размера $b_{\text{щ}}$ (см. табл. П4.1).

При выборе ширины зоны коммутации следует иметь в виду что увеличение ширины зоны коммутации приводит к сокращению числа проводников якоря, участвующих в создании электромагнитного момента, что влечет увеличение тока в якоре и ухудшение условий коммутации. Поэтому желательно, чтобы щетки перекрывали не более двух-трех коллекторных пластин.

Выбор марки щеток для МПТ — весьма сложная задача, так как от марки щеток зависят коммутация машины и срок службы коллекторно-щеточного узла. На практике марку щеток определяют в соответствии с условиями работы согласно табл. П4.2, где приведены основные технические данные марок наиболее распространенных щеток и области их применения.

Контактная площадь всех щеток, м^2,

$$\Sigma S_{\text{щ}} = \frac{2I_{\text{н}}}{J_{\text{щ}}} \cdot 10^4 \qquad (7.10)$$

где $J_{\text{щ}}$ — плотность тока в щеточном контакте, А/см^2 (см. табл. П4.2). Контактная площадь щеток одного бракета (щеточного болта)

$$S_{\text{щ.б}} = \frac{\Sigma S_{\text{щ}}}{2p} \qquad (7.11)$$

По табл. П4.1 выбирают длину $l_{\text{щ}}$ одной щетки, определяют площадь щеточного контакта одной щетки $S_{\text{щ}} = b_{\text{щ}} l_{\text{щ}}$ и рассчитывают число щеток на один щеточный болт:

$$N_{\text{щ}} = \frac{S_{\text{щ.б}}}{S_{\text{щ}}} \qquad (7.12)$$

По выбранным размерам щеток $b_{\text{щ}}, l_{\text{щ}}$ и $N_{\text{щ}}$ определяют фактически контактную площадь и уточняют плотность тока в щеточном контакте $J_{\text{щ}}$.

Активная длина коллектора при шахматном расположении щеток по длине коллектора, м,

$$l_{\text{к}} = N_{\text{щ}}\left(l_{\text{щ}} + 0{,}008\right) + 0{,}01 \qquad (7.13)$$

где $l_{\text{щ}}$ — длина щетки, м.

Механический расчет коллекторов приведен в §12.

8. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов должна создать в зоне коммутации магнитное поле, индуктирующее в коммутируемой секции ЭДС коммутации $E_{\text{к}}$, направленную встречно реактивной ЭДС E_p. Электродвижущая сила $E_{\text{к}}$ должна быть несколько больше E_p, чтобы процесс коммутации протекал с некоторым ускорением. При расчете индукции в воздушном зазоре под добавочными полюсами $B_{\delta\text{д}}$ принимают расчетное значение реактивной ЭДС $E_p{}' = (1{,}05 \div 1{,}1)\, E_p$.

В этом случае индукция $B_{\delta\text{д}}$, Тл,

$$B_{\delta\text{д}} = \frac{E_p{}'}{2 l_\delta v_a} \qquad (8.1)$$

Ширина наконечника добавочного полюса (рис. 8.1), м,

$$b_{\text{д.н}} \le (0{,}55 \div 0{,}75) b_{\text{з.к}} \qquad (8.2)$$

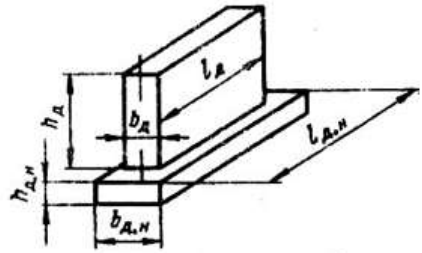


Рис. 8.1. Размеры добавочных полюсов

Длину наконечника добавочного полюса $l_{\text{д.н}}$ принимают равной длине якоря: $l_{\text{д.н}} = l_a$.

Магнитный поток добавочного полюса в воздушном зазоре в зоне коммутации, Вб,

$$\Phi_{\delta\text{д}} = B_{\delta\text{д}} b_{\text{д.н}}{}' l_{\text{д.н}} \qquad (8.3)$$

где $b_{д.н}' = b_{д.н} + 2\delta_д$ — расчетная ширина полюсного наконечника добавочного полюса.

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса, Вб,

$$\Phi_д = \sigma_д \Phi_{\delta д} \qquad (8.4)$$

где $\sigma_д$ — коэффициент рассеяния добавочных полюсов; $\sigma_д$= 2,5÷3,5 для машин без компенсационной обмотки; $\sigma_д$= 2 для машин с компенсационной обмоткой.

Ширину сердечника добавочного полюса $b_д$ предварительно определяют по зависимости на рис. 8.2. Длину сердечника добавочного полюса $l_д$ принимают равной длине якоря; для машин с диаметром якоря до 0,132 м длина $l_д$ короче длины полюсного наконечника на (5÷10)·10^{-3} м.

Индукция в сердечнике добавочного полюса, Тл,

$$B_{с.д} = \frac{\Phi_д}{b_д l_д} \qquad (8.5)$$

Она не должна превышать 1,6 Тл.

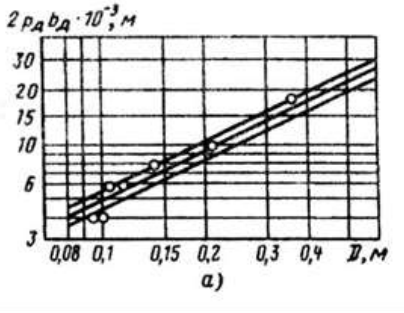


Рис. 8.2. Зависимость ширины добавочного полюса от диаметра якоря

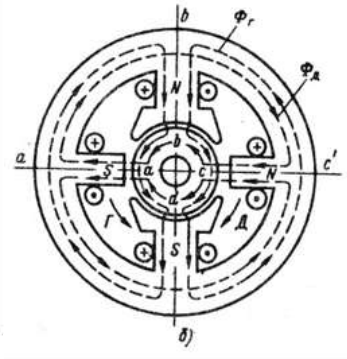


Рис. 8.3. Магнитные цепи главных и добавочных полюсов

Сердечники добавочных полюсов выполняют из стали марки Ст3 при диаметрах якоря до 0,16 м, при больших диаметрах — из тегов электротехнической стали марки 3411 толщиной 1,0 мм. В зависимости от отношения ширины полюсного наконечника к ширине сердечника форма поперечного сечения добавочного полюса может быть прямо-

угольной (см. рис. 8.1) и прямоугольной со скошенным наконечником при $b_{д.н} < b_д$.

Для расчета МДС обмотки добавочных полюсов необходимо определить магнитные напряжения отдельных участков и полную МДС магнитной цепи на один полюс в соответствии с табл. 8.1.

Распределение магнитных потоков главных полюсов $Ф_г$ и добавочных полюсов $Ф_д$ в магнитной системе машины показано на рис. 8.3.

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов для МПТ без компенсационной обмотки находится в пределах

$$F_д = (1{,}2 \div 1{,}4)\frac{A\tau}{2} \qquad (8.6)$$

Число витков обмотки на один добавочный полюс

$$w_д = \frac{F_д a_д}{I} \qquad (8.7)$$

где $a_д$ — число параллельных ветвей обмотки добавочного полюса, обычно $a_д$ равно числу параллельных ветвей компенсационной обмотки; число витков округляется до ближайшего целого числа.

Сечение провода обмотки добавочных полюсов, м^2,

$$q_д = \frac{I}{a_д J_д} \qquad (8.8)$$

Средние значения $J_д$ МПТ при исполнении по степени защиты IP44 могут быть приняты равными $(2\div3)\cdot10^6$ А/м^2, при исполнении по степени защиты IP22 $(4{,}5\div6{,}5)\cdot10^6$ А/м^2.

Марку провода и тип обмотки добавочных полюсов выбирают согласно приложения 2. По выбранному стандартному сечению проводника уточняют плотность тока $J_д$.

После проверки размещения катушек главных и добавочных поносов с учетом принятых припусков на разбухание катушек (см. § 6) определяют окончательные размеры витка катушки, м,

$$l_{д.ср} = 2\left(b_д + l_д\right) + \pi(b_{кт.д} + 2\Delta_{из}) \qquad (8.9)$$

где $b_д$ и $l_д$ — ширина и длина сердечника добавочного полюса; $b_{кт.д}$ — ширина катушки добавочного полюса; $\Delta_{из}$ — односторонний размер зазора между сердечником добавочного полюса и катушкой с учетом изоляции сердечника: $\Delta_{из} = (1{,}7\div2{,}2)\cdot10^{-3}$ м при диаметрах якоря до 500мм.

Таблица 8.1. **Расчет МДС обмотки добавочных полюсов**

№ п/п	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
1	2	3	4	5
1	Магнитный поток в воздушном зазоре	$\Phi_{\delta д}$	Вб	
2	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta д} = \frac{\Phi_{\delta д}}{b_д l_д}$	Тл	
3	Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_{\delta д} = 0{,}8\delta_д k_{\delta д} B_{\delta д} \cdot 10^6$	А	
4	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_{Z1} = k_{Z1} B_{\delta д}$ $B_{Z2} = k_{Z2} B_{\delta д}$ $B_{Z3} = k_{Z3} B_{\delta д}$	Тл Тл Тл	
5	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря (по приложению 3)	H_{Z1} H_{Z2} H_{Z3}	А/м А/м А/м	
6	Средняя напряженность магнитного поля в зубцах	$H_{Z ср} = \frac{H_{Z1} + 4H_{Z2} + H_{Z3}}{6}$	А/м	
7	Магнитное напряжение зубцов	$F_Z = L_Z H_{Z ср}$	А	
8	Магнитная индукция в спинке ярма: на участке согласного направления главного потока добавочных полюсов на участке встречного направления главного потока и потока добавочных полюсов	$B_{j1} = \frac{\Phi_\delta + \Phi_{\delta д}}{2S_j}$ $B_{j1} = \frac{\Phi_\delta - \Phi_{\delta д}}{2S_j}$	Тл Тл	
9	Напряженность магнитного поля: на участке с индукцией B_{j1} на участке с индукцией B_{j2} средняя напряженность магнитного поля в ярме	H_{j1} H_{j2} $H_{j ср} = \frac{H_{j1} - H_{j2}}{2}$	А/м А/м А/м	
10	Магнитное напряжение ярма якоря	$F_j = H_{j ср} L_j$	А	
11	Магнитный поток добавочного полюса	$\Phi_д = \sigma_д \Phi_{\delta д}$	Вб	
12	Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса	$B_{с.д} = \frac{\Phi_д}{b_д l_д}$	Тл	
13	Напряженность магнитного поля в сердечнике добавочного полюса	$H_{с.д}$	А/м	
14	Магнитное напряжение в сердечнике добавочного полюса	$F_{с.д} = H_{с.д} h_д$	А	
15	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и добавочным полюсом	$F_{\delta д2} = 0{,}8 B_{сд} \delta_{д2} \cdot 10^6$	А	

продолжение табл.8.1

1	2	3	4	5
16	Магнитная индукция в станине: на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов на участке встречного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{c1}=\frac{\Phi_г+\Phi_д}{2S_c}$ $B_{c2}=\frac{\Phi_г-\Phi_д}{2S_c}$	Тл Тл	
17	Напряженность магнитного поля в станине: на участке с индукцией B_{c1} на участке с индукцией B_{c2}	H_{c1} H_{c2}	А/м А/м	
18	Средняя напряженность магнитного поля в станине	$H_{c.ср}=\frac{H_{c1}-H_{c2}}{2}$	А/м	
19	Магнитное напряжение участка станины	$F_c=H_{c.ср}L_c$	А	
20	Сумма магнитных напряжений всех участков	$F_{д\Sigma}=F_{\delta д}+F_Z+F_j+F_{сд}+F_{\delta д2}+F_c$	А	
21	МДС обмотки добавочного полюса	$F_д=F_{д\Sigma}+\frac{A\tau}{2}$	А	

Сопротивление обмотки добавочного полюса в холодном состоянии, Ом,

$$R_д=\rho_\vartheta\frac{2p_д l_{д.ср}w_д}{q_д a_д{}^2} \qquad (8.10)$$

Масса меди обмотки добавочных полюсов, кг,

$$m_д=8900 l_{д.ср}w_д 2p_д q_д \qquad (8.11)$$

9. ПОТЕРИ И КПД. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Коэффициент полезного действия машины, %,

$$\eta=\frac{P_н}{P_1}\cdot 100=\frac{P_н}{P_н+\Sigma P}\cdot 100 \qquad (9.1)$$

где $P_н$— номинальная полезная мощность машины, кВт; ΣP — сумма потерь в машине, кВт; P_1 — потребляемая мощность, кВт.

Сумма потерь в машине в общем случае, кВт,

$$\Sigma P=P_{э.а}+P_{э.с}+P_{э.в}+P_{э.д}+P_{э.к}+P_щ+P_{ст}+P_{мех}+P_{доб} \qquad (9.2)$$

где $P_{э.а}$ - электрические потери в обмотке якоря; $P_{э.с}$ - то же, в стабилизирующей обмотке; $P_{э.в}$ - то же, в обмотке параллельного возбуж-

дения; $P_{э.д}$ - то же, в обмотке добавочных полюсов; $P_{э.к}$ - то ж компенсационной обмотке; $P_{щ}$ - то же, в переходном контакте щеток; $P_{ст}$- магнитные потери в стали якоря; $P_{мех}$ - суммарные механические потери; $P_{доб}$ - добавочные потери.

Электрические потери в обмотке якоря, кВт,

$$P_{э.а} = I^2 R_a \cdot 10^{-3} \qquad (9.3)$$

Электрические потери в стабилизирующей обмотке, кВт,

$$P_{э.с} = I^2 R_с \cdot 10^{-3} \qquad (9.4)$$

Электрические потери в цепи обмотки параллельного возбуждения, кВт,

$$P_{э.в} = I^2 R_в \cdot 10^{-3} = \frac{{U_в}^2}{R_в} \cdot 10^{-3} \qquad (9.5)$$

Электрические потери в обмотке добавочных полюсов, кВт,

$$P_{э.д} = I^2 R_д \cdot 10^{-3} \qquad (9.6)$$

Электрические потери в компенсационной обмотке, кВт,

$$P_{э.к} = I^2 R_к \cdot 10^{-3} \qquad (9.7)$$

Электрические потери в переходном контакте щеток, кВт,

$$P_{щ} = 2\Delta U_{щ} I \cdot 10^{-3} \qquad (9.8)$$

Значение $2\Delta U_{щ}$ определяют для конкретной марки щеток по табл. П4.2.

Магнитные потери в стали зубцов и ярма якоря, кВт,

$$P_{ст} = 2{,}3\rho_{1.0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{\beta}(B_Z^2 m_Z + {B_j}^2 m_j) \qquad (9.9)$$

Масса стали зубцов якоря с овальными пазами, кг,

$$m_Z = 7800 Z b_Z (h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}) l_\delta k_c \qquad (9.10)$$

Масса стали зубцов с прямоугольными пазами, кг,

$$m_Z = 7800 Z b_{Z\text{ср}} h_\text{п} l_\delta k_c \qquad (9.11)$$

Масса стали ярма якоря, кг,

$$m_j = 7800 \frac{\pi\left[(D-2h_\text{п})^2 - D_0{}^2\right]}{4} l_\delta k_c \qquad (9.12)$$

При наличии аксиальных каналов в спинке ярма необходимо уменьшить площадь сечения стали ярма на значение, равное площади поперечного сечения всех каналов.

Сумма механических потерь, кВт,

$$P_\text{мех} = P_\text{т.щ} + P_\text{вент} + P_\text{т.п} \qquad (9.13)$$

где $P_\text{т.щ}$ — потери на трение щеток о коллектор; $P_\text{вент} + P_\text{т.п}$ — потери на вентиляцию и трение в подшипниках.

При принятых значениях удельного нажатия на щетку $3 \cdot 10^4$ Па и коэффициенте трения щеток о коллектор, составляющем $f \approx 0{,}25$, потери на трение в щеточном контакте, кВт,

$$P_\text{т.щ} = 7{,}5 \Sigma S_\text{щ} v_\text{к} \qquad (9.14)$$

где $\Sigma S_\text{щ}$ — суммарная площадь контакта всех щеток, м^2; $v_\text{к}$ — окружая скорость коллектора, м/с.

Средние значения потерь $P_\text{вент} + P_\text{т.п}$ можно определить по рис. 9.1. Семейство кривых *А* на этом рисунке относится к машинам с вентиляторами, установленными на валу машины, семейство кривых *Б* — к машинам, приводные двигатели вентиляторов которых не установлены на машинах.

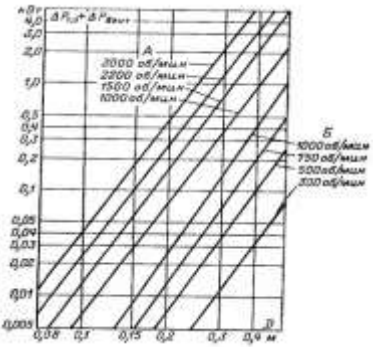


Рис. 9.1. Потери на вентиляцию и в подшипниках

Добавочные потери при номинальной нагрузке, кВт:
для некомпенсированных машин

$$P_{\text{доб}} = 0{,}01\frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} \qquad (9.15)$$

для компенсированных машин

$$P_{\text{доб}} = 0{,}05\frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} \qquad (9.16)$$

где $\eta_{\text{н}}$ — предварительное значение КПД по рис. 2.3.

При номинальной нагрузке КПД определяют в следующем порядке. Задают значения тока якоря $I \approx 0{,}1I_{\text{н}}$; $I \approx 0{,}25I_{\text{н}}$; $I \approx 0{,}5I_{\text{н}}$; $I \approx 0{,}75I_{\text{н}}$; $I \approx 1{,}0I_{\text{н}}$; $I \approx 1{,}25I_{\text{н}}$. Для каждого значения тока определяют мощность, кВт,

$$P_1 = U_{\text{н}}I \cdot 10^{-3} + U_{\text{в}}I_{\text{в.н}} \cdot 10^{-3} \qquad (9.17)$$

Рассчитывают суммарные потери ΣP. Для каждого значения тока определяют полезную мощность на валу P_2 и по (9.1) КПД.

Строят зависимости $P_2 = f(I)$; $\eta = f(I)$ и для номинального значения $P_{2\text{н}}$ определяют номинальное значение тока якоря $I_{\text{н}}$ и номинальный КПД $\eta_{\text{н}}$.

Электромагнитная мощность при номинальном значении тока якоря

$$P' = P_1 - P_{\text{э}.a} - P_{\text{э.с}} - P_{\text{э.д}} - P_{\text{э.к}} - P_{\text{щ}} \qquad (9.18)$$

Номинальное значение ЭДС, В,

$$E_{\text{н}} = \frac{P'}{I_{\text{н}}} \qquad (9.19)$$

Номинальное значение магнитного потока $\Phi_{\delta\text{н}}$ и суммарную МДС $F_{\Sigma\text{н}}$ определяют по характеристике холостого хода машины; по переходной характеристике рассчитывают размагничивают действие реакции якоря F_{qd}.

Номинальная частота вращения, об/мин,

$$n_{\text{н}} = \frac{60E_{\text{н}}}{\frac{p}{a}N\Phi_{\delta\text{н}}} \qquad (9.20)$$

Номинальный ток обмотки параллельного возбуждения,

$$I_{\text{в.н}} = \frac{F_\Sigma - F_c + F_{qd}}{w_\text{в}} \qquad (9.21)$$

Вращающий момент на валу двигателя, Н·м,

$$M = 9{,}57 \cdot 10^3 \frac{P_2}{n} \qquad (9.22)$$

Ток двигателя, А,

$$I_{1\text{н}} = I_\text{н} + I_{\text{в.н}} \qquad (9.23)$$

Зависимости *M, n, η, I* от полезной мощности на валу определяют рабочие характеристики двигателя.

При расчете рабочих характеристик генераторов принимается частота вращения якоря *n = const.*

Напряжение на выводах генератора, В, определяется из основного уравнения напряжения

$$U = E - I\left(R_a + R_\text{к} + R_\text{с} + R_\text{д}\right) - 2\Delta U_\text{щ} \qquad (9.24)$$

где E — ЭДС обмотки якоря; $R_a, R_\text{к}, R_\text{с}, R_\text{д}$ — сопротивления, определяются по (3.29), (4.14), (6.6), (6.12) соответственно; $2\Delta U_\text{щ}$ — падение напряжения в щеточном контакте, принимается согласно приложению 4.

Однако E в (9.24) является сложной функцией тока якоря I, тока возбуждения $I_\text{в}$, и состояния магнитной цепи машины. Для определения ЭДС E необходимо задаться током возбуждения $I_\text{в}$, током якоря I, рассчитать результирующую МДС:

$$F_\Sigma = F_\text{в} - F_{qd} \pm F_d + F_c \qquad (9.25)$$

Далее по характеристике намагничивания, построенной согласно табл.5.2, определяется ЭДС E.

Если при указанных расчетах напряжение на выводах генератора U = const, а рассчитывается зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_\text{в} = f(I)$, то полученная характеристика называется регулировочной.

Если принимается полное сопротивление в цепи обмотки возбуждения $r_{\text{в}\Sigma}$ = *const* и определяется зависимость напряжения на выходах машины от тока нагрузки: $U = f(I)$, то полученная характеристика является внешней характеристикой генератора. В этом случае МДС в (9.25)

$$F_{в} = \frac{U}{r_{вΣ}} w_{в}$$

$w_{в}$ — число витков обмотки возбуждения.

Путем расчета серии внешних характеристик для нескольких значений $r_{вΣ}$ можно построить нагрузочную характеристику, дающую зависимость напряжения U на выводах машины от тока возбуждения I, для принятого значения тока нагрузки.

10. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Электромеханическое преобразование энергии в ЭМ сопровождается преобразованием электрической или механической энергии в тепло. Тепло, выделяемое при работе машины, нагревает отдельные ее части, повышая их температуру. Чрезмерное повышение температуры может вызвать в ЭМ снижение электрической и механической прочности изоляции обмоток. Допустимая предельная температура определяется классом нагревостойкости изоляции обмоток.

Температура частей ЭМ зависит от температуры охлаждающей среды. В связи с неизбежными колебаниями температуры охлаждающей среды принято тепловую напряженность частей электрической машины характеризовать превышением их температуры над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{охл} \qquad (10.1)$$

где ϑ — температура рассматриваемой части ЭМ; $\vartheta_{охл}$ — температура охлаждающей среды.

Номинальные данные ЭМ (мощность, напряжение, ток, частота вращения, КПД и др.) обычно относятся к работе машины на высоте до 1000 м над уровнем моря при температуре окружающей среды до +40° С и охлаждающей воды до +30° С, но не выше +33° С, если в стандартах или технических условиях на проектируемую машину не указаны другие требования.

При длительной работе ЭМ влияние на тепловой режим и нагрев ее отдельных частей оказывают изменения напряжения сети, частоты, нагрузки и другие факторы.

Предельная допускаемая температура для какой-либо части ЭМ определяется как сумма допускаемого превышения температуры, взятой из табл. 10.1, и предельной допускаемой температуры охлаждающей среды +40° С, принятой для ЭМ общего назначения.

Предельная допускаемая температура подшипников не должна превышать следующих значений: для подшипников скольжения 80° С

(температура масла не должна быть при этом выше 65° С), для подшипников качения 100° С.

Измерение температуры отдельных частей ЭМ при тепловых испытаниях осуществляют методами термометра (1), сопротивления (только для обмоток) (2) и температурных индикаторов, уложенных в паз (3) (см. табл. 10.1).

При измерениях температуры методом термометра согласно ГОСТ 11828—86 температура фиксируется термометром, прикладываемым к доступным частям машины.

Измерение температуры обмоток методом сопротивления применяют для определения температуры обмотки по возрастанию ее сопротивления.

Для определения средней температуры обмоток изготовленных из меди, используют следующую формулу:

$$\Delta\vartheta = \frac{r_\vartheta - r_x}{r_x}(235 + \vartheta_x) + \vartheta_x - \vartheta_{\text{охл}} \qquad (10.2)$$

где r_ϑ — сопротивление обмотки в нагретом состоянии, Ом; r_x — сопротивление обмотки в холодном состоянии, Ом; ϑ_x — температура обмотки в холодном состоянии, °С.

Для обмоток, изготовленных из алюминия, вместо числа 235 следует подставить число 245.

Согласно ГОСТ 183—74 на общие технические требования к ЭМ установлены восемь номинальных режимов работы, из которых наиболее часто встречаются следующие: 1) продолжительный (условное обозначение *S1*); 2) кратковременным (*S2*) с длительностью рабочего периода 10, 30, 60 и 90 мин; 3) повторно-кратковременный (*S3*) с относительной продолжительностью включения ПВ-15, 25, 40 и 60 % длительности одного цикла работы, равного 10 мин; 4) перемежающийся с чередованием неизменной номинальной нагрузки и холостого хода (*S6*) без выключения машины с продолжительностью нагрузки ПН-15, 25, 40 и 60 % длительности одного цикла работы, равного 10 мин.

Согласно ГОСТ 20459—87 обозначения способов охлаждения ЭМ, принятые в технической документации всех видов, состоит из латинских букв *IC* — первых букв английских слов *International Cooling* и следующих за ними буквы, характеризующей вид хладагента (*A* — воздух, *H* — водород, *N* — азот, *C* — диоксид углерода, *Fr* — фреон, *W* — вода, *U* — масло, *Kr* — керосин) и двух цифр: первая условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая — способ перемещения хладагента. Условное обозначение устройства цепи циркуляции содержит 10 цифр (от 0 до 9): *0* — свободная циркуляция наружного воздуха; *1—3* — охлаждение при помощи проводящей (*1*), отводящей (*2*) или обеих труб (*3*); *4* — охлаждение наружной поверхности с использованием окружающей среды; *5,6* — охлаждение окружающей

средой при помощи встроенного (*5*) или пристроенного (*6*) теплообменника; *7, 8* — охлаждение при помощи встроенного (*7*) или пристроенного (*8*) охладителя; *9* — охлаждение при помощи охладителя, установленного отдельно от машины. Способы перемещения хладагента обозначаются второй цифрой: *0* — свободная конвекция; *1* — самовентиляция; *2* и *3* — перемещение хладагента встроенным или пристроенным устройством, установленным непосредственно на валу машины (*3*) или связанным с валом через зубчатую или ременную передачу (*2*); *5* и *6* — то же, при независимом устройстве; *7* — перемещение хладагента осуществляется отдельным устройством.

Если в машинах применяют двухконтурные системы охлаждения, то способы охлаждения обозначают, начиная с цепи более низкой температуры. Например, закрытая машина с водородным охлаждением и встроенным водяным охладителем, циркуляция воды, в охладителе которой осуществляется отдельным и независимым от охлаждаемой машины насосом или от водопроводной сети, имеет обозначение *IC37H71*. Закрытая машина, которая имеет обмотку статора с непосредственным водяным охлаждением и обмотку ротора, охлаждаемую водородом, и циркуляция воды в обмотке статора осуществляется отдельным насосом, обозначается так: *ICW87* — обмотка статора, *H71* — обмотка ротора.

Самой простой схемой охлаждения, которая применяется преимущественно в машинах мощностью до 1 кВт, является схема с естественной вентиляцией без применения особых средств для повышения интенсивности охлаждения.

Большинство ЭМ общего назначения, за исключением турбо- и гидрогенераторов, а также синхронных компенсаторов охлаждаются воздухом и имеют принудительную схему вентиляции. В случае принудительной вентиляции цепь охлаждения машины может быть:

разомкнутой — воздух поступает из окружающей среды, проходит каналы тракта охлаждения машины и выбрасывается снова в окружающую среду;

замкнутой — поток охлаждающего воздуха не связан с окружающей средой, а циркулирует по замкнутому контуру, включающему в себя и внутренний объем закрытой машины. При замкнутой вентиляции охлаждающий воздух отдает свою теплоту либо воде в специальном газоохладителе, либо корпусу машины через его внутреннюю поверхность, как это осуществляется, например, в АД закрытого исполнения, обдуваемых наружным вентилятором.

В зависимости от направления движения воздуха (газа) внутри машины различают аксиальную, аксиально-радиальную и радиальную схемы вентиляции.

Таблица 10.1. **Предельно допустимые превышения температуры частей электрических машин при температуре газообразной охлаждающей среды +40° С и высоте над уровнем моря не более 1000 м** (по ГОСТ 183—74)

№ п/п	Часть электрических машин	Изоляционный материал (по ГОСТ 8865—93)														
		A			E			B			C			H		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВ·А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	—	60	60	—	70	70	—	80	80	—	100	100	—	125	125
2	Обмотки:	50	60	—	65	75	—	70	80	—	85	100	—	105	125	—
	а) обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВ·А с длиной сердечника менее 1 м															
	б) обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3,4 и 5 настоящей таблицы															
	в) якорные обмотки, соединенные с коллектором															
3	Обмотки возбуждения неявнополюсных машин с возбуждением постоянным током	—	—	—	—	—	—	—	90	—	—	100	—	—	135	—
4	Однорядные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями	65	65	—	80	80	—	90	90	—	110	110	—	135	135	—
5	Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев и компенсационные обмотки	60	60	—	75	75	—	80	80	—	100	100	—	125	125	—
6	Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
7	Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	Превышение температуры этих частей не должно достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения изоляционных или других смежных материалов самих элементов и соседних частей														
8	Сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с изолированными обмотками															
9	Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с изолированными обмотками	60	—	60	75	—	75	80	—	80	100	—	100	125	—	125
10	Коллекторы и контактные кольца незащищенные и защищенные	60	—	—	70	—	—	80	—	—	90	—	—	100	—	—

Если ЭМ имеет схему самовентиляции, то напор в вентиляционной системе создастся вентилятором, установленным на валу машины. Эта схема вентиляции подразделяется на два класса: нагнетательную и вытяжную. При нагнетательной схеме вентиляции охлажденный газ

под воздействием избыточного давления, создаваемого нагнетателем, поступает в вентиляционные каналы активной зоны машины. При вытяжной схеме вентиляции охлаждающий газ поступает в вентиляционные каналы машины под действием разряжения, создаваемого вентилятором.

Вытяжная вентиляция обладает тем преимуществом, что газ поступает в машину без предварительного его подогрева вентилятором, что несколько снижает превышение температуры обмоток.

В практике электромашиностроения применяют как нагнетательные, так и вытяжные схемы вентиляции, которые по числу струй бывают одноструйными и многоструйными. При многоструйной схеме вентиляции каналы каждой струи имеют независимые выходы подогретого воздуха в сборную зону перед нагнетателем.

Схему принудительной вентиляции с помощью независимого вентилятора применяют в машинах с широким диапазоном регулирования частоты вращения, когда система самовентиляции при малых частотах вращения ротора не является эффективной. По этой схеме выполняют отдельные модификации АД серии 4А и МПТ серии 2П.

По способу отвода тепла от тепловыделяющих элементов ЭМ различают схемы косвенного и непосредственного охлаждения: в первом случае отвод тепла осуществляется от открытых поверхностей активных частей машины, во втором хладагент по специальным каналам подводится к проводникам обмоток машины, отбирая тепло непосредственно от обмоток.

Все ЭМ общего назначения выполняются по системе воздушного косвенного охлаждения.

Особенности конструктивного исполнения отдельных ЭМ с воздушным косвенным охлаждением определили их схему вентиляции: крупные МПТ и синхронные двигатели (СД) выполняются преимущественно с радиальной схемой вентиляции. АМ большой мощности имеют радиальную, аксиальную и аксиально-радиальную схемы.

С ростом единичной мощности ЭМ возрастают удельные потери в объеме машины, поэтому воздушные системы охлаждения становятся неэффективными и для охлаждения турбо- и гидрогенераторов и синхронных компенсаторов применяют схемы косвенного охлаждения водородом совместно со схемами непосредственно жидкостного охлаждения. В качестве хладагента в этих случаях используют воду, которая обеспечивает самую высокую по сравнению с другими жидкостями эффективность охлаждения. Схема непосредственного водяного охлаждения обмоток статора и ротора находит применение в конструкциях мощных турбо- и гидрогенераторов.

Система непосредственного водяного охлаждения обычно сочетается с системой косвенного газового охлаждения активных частей машины.

Теплообмен в ЭМ происходит путем теплопроводности, конвективного теплообмена и излучения.

Количество тепла *Q*, передаваемое за единицу времени через произвольную изотермическую поверхность, прямо пропорционально температурному градиенту $grad\Delta\vartheta$ в направлении теплового потока:

$$q = -\lambda\, grad\Delta\vartheta \qquad (10.3)$$

где $q = \frac{Q}{S}$ — плотность теплового потока, Вт/м^2; λ — теплопроводность материала тела; знак минус показывает, что тепловой поток распространяется в направлении уменьшения температуры, т. е. от точки тела с большей температурой к точке, имеющей меньшую температуру.

При одномерном распространении тепла, например, в направлении оси *x* имеем

$$grad\Delta\vartheta = \frac{d\Delta\vartheta}{dx} \qquad (10.4)$$

Теплопроводность λ характеризует способность вещества проводить тепло, определяется физическим свойством вещества и зависит от его состава, температуры и давления (для газообразных веществ). Наиболее достоверные значения теплопроводности получают экспериментальным путем.

В табл. 10.2 приведены значения теплопроводности различных материалов, применяемых в электромашиностроении.

Теплообмен между поверхностью твердого тела и жидкой (газообразной) средой, конвективный теплообмен описывается экспериментальным законом Ньютона—Рихмана, связывающим плотность теплового потока на поверхности q с температурами поверхности $\vartheta_{\text{п}}$ и среды $\vartheta_{\text{охл}}$:

$$q = \frac{Q}{S} = \alpha(\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_{\text{охл}}) = \alpha\Delta\vartheta \qquad (10.5)$$

Соответственно перепад температуры между поверхностью и охлаждающей средой составит

$$\Delta\vartheta = \frac{q}{\alpha} \qquad (10.6)$$

где α — коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(м^{2}· ° С), характеризующий интенсивность теплообмена.

Таблица 10.2. **Значения теплопроводности материалов**

Материал	Вт/(м· ° С)
Медь	380÷395
Алюминий	198÷220
Серебро	420
Сталь листовая электротехническая марок:	
1211, 1212, 1213	35÷37
1311, 1411, 1412, 1413	19÷24
1511, 1512, 1513	15÷18
Сталь листовая электротехническая, шихтованная поперек пакетов:	
лист 0,5 мм, покрытие лаком	3,1
сталь 1521 0,35 мм, пропитка компаундом ЭК-1М	1,9
Дюралюминий	128
Сплавы алюминия (АК3, АК4, АКМ2-1)	147÷159
Сталь (марки 08, 10, 20, 35, 45)	48÷64
Стеклополотно	0,17÷0,18
Стеклолакоткань	0,18÷0,21
Слюда (флогонит)	0,51
Миканит ГФС	0,21÷0,41
Пленка ПЭТФ:	
лумиррор	0,11
мелинекс	0,13
терфан	0,17
лавсан	0,21
Пленка полиимид	0,27
Пленка фторопласт 3/4	0,10/0,22
Пленка экскапон	0,20
Стеклослюдинит (ФС25К-40/ГС25КН)	0,12/0,24
Стеклотекстолит	0,33÷0,43
Текстолит	0,17÷0,22
Электронит	0,12÷0,18
Изоляция пазовая обмоток якоря машин постоянного тока и роторов машин переменного тока:	
классы А, Е	0,10
классы В, F, Н	0.16
То же статорных обмоток асинхронных машин:	
классы А, В, Е	0,10
классы В (компаундированная), F, Н	0,16
Изоляция монолит-2 различного состава	0,19÷0,32
Воздух при ρ = 101 кПа, ϑ= 40 ° С	0,0266

Теплообмен путем излучения для ЭМ, работающих в обычных условиях, не учитывается из-за небольшой его доли в общем процессе теплообмена. Отвод тепла путем излучения становится основным при работе машин в вакууме.

Испарительное охлаждение в машинах общепромышленного применения практически не используется.

Испытания ЭМ на нагрев показывают, что в области номинальных нагрузок машины общего назначения, имеющие сравнительно низкие удельные тепловые нагрузки, подчиняются закону нагревания идеального однородного тела. В данном случае с достаточной точностью можно считать, что тепло, рассеиваемое с поверхности машины *S*, пропорционально превышению температуры поверхности.

При неизменных потерях *Q*, выделяемых в объеме машины, дифференциальное уравнение нагревания, выражающее баланс энергии за время *dt*, будет иметь вид

$$Qdt = cmd(\Delta\vartheta) + \alpha S\Delta\vartheta dt \qquad (10.7)$$

где с — эквивалентная удельная теплоемкость машины, Дж/(кг· ° С); m— масса машины, кг.

В установившемся режиме, когда достигнуто конечное превышение температуры машины, все выделяемое тепло рассеивается в окружающую среду:

$$Qdt = \alpha\Delta\vartheta_\infty Sdt \qquad (10.8)$$

или

$$Q = \alpha\Delta\vartheta_\infty S$$

Общим решением уравнения (10.4) при одномерном выделении теплоты будет

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 + (\Delta\vartheta_\infty - \Delta\vartheta_0)(1 - e^{-t/T_1}) \qquad (10.9)$$

где $\Delta\vartheta_0$ — начальное превышение температуры машины; T_1 — постоянная времени нагревания машины, равная $T_1 = cm/aS$.

При $\Delta\vartheta_\infty > \Delta\vartheta_0$ уравнение (10.9) соответствует процессу нагревания, при $\Delta\vartheta_\infty < \Delta\vartheta_0$ — процессу охлаждения. Кривые нагревания и охлаждения машины представлены на рис. 10.1 и 10.2. Если в процессе нагревания $\Delta\vartheta_0 = 0$, то уравнение (10.9) принимает вид

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty(1 - e^{-t/T_1}) \qquad (10.10)$$

Если при охлаждении конечная температура машины сравняется с температурой окружающей среды, то $\Delta\vartheta_\infty = 0$ и уравнение охлаждения по (10.9) имеет вид

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 e^{-t/T_1} \qquad (10.11)$$

При экспоненциальном законе нарастания температуру можно считать установившейся (в пределах точности до 5 %) через время $t = (3 \div 4)T_1$. Согласно (10.8) ее значение составит

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{Q}{aS} \qquad (10.12)$$

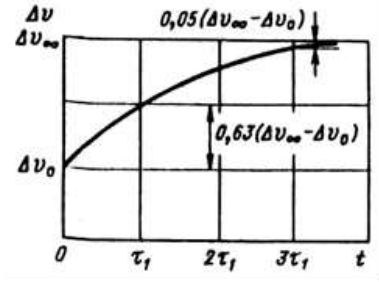


Рис. 10.1. Кривая нагревания машины

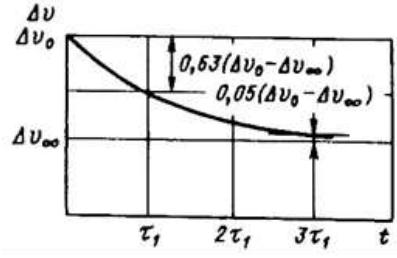


Рис. 10.2. Кривая охлаждения машины

Основными источниками выделения теплоты в ЭМ являются обмотка, элементы магнитопровода и конструктивные элементы, в которых возникают потери от перемагничивания, а также тепло, выделяемое в скользящем контакте.

На пути движения тепловых потоков от источников тепла происходит перепад температуры в активных частях машины, в изоляции и между охлаждающими поверхностями и охлаждающей средой. В тепловом расчете определяются все внутренние перепады и превышения температуры внешней поверхности охлаждаемых частей ЭМ над температурой охлаждающего воздуха.

В практических расчетах часто ограничиваются определением среднего превышения температуры обмоток, т. е. допускают, что температура обмоток в стали пакетов статора (ротора) постоянна.

Для определения полного превышения температуры обмоток необходимо учесть подогрев охлаждающей среды, которая, поступая в машину, воспринимает тепло от нагретых частей.

Для приближенной оценки тепловой напряженности МПТ достаточно определить превышения температуры отдельных ее активных частей при выбранных электромагнитных нагрузках и геометрических размерах. Обычно рассчитывают средние превышения температуры

обмоток якоря, возбуждения, добавочных полюсов и компенсационной обмотки, а также поверхности коллектора. Эти превышения температуры с учетом приближенного расчета должны быть ниже предельных допускаемых значений, установленных ГОСТ 183-74, не менее чем на 10% (см. табл. 10.1).

При расчете средних превышений температуры активных частей машины необходимо сопротивление обмоток привести к предельным допускаемым температурам для выбранного класса изоляции. Для этого сопротивления, вычисленные при расчете рабочих характеристик, необходимо умножить на коэффициент $k_{\text{т}}$. При классе нагревостойкости изоляции В $k_{\text{т}} = 1{,}15$, при классе нагревостойкости F $k_{\text{т}} = 1{,}07$, при классе нагревостойкости Н $k_{\text{т}} = 1{,}145$.

Для теплового и вентиляционного расчетов необходимо установить мощности тепловых потоков, площади отдельных поверхностей и коэффициенты теплоотдачи с этих поверхностей.

Потери мощности в обмотках с учетом поправочного коэффициента $k_{\text{т}}$, Вт:

- в обмотке якоря

$$P_{\text{ат}} = k_{\text{т}} I_{\text{н}}^2 R_{\text{а}} \qquad (10.13)$$

- в обмотке добавочных полюсов

$$P_{\text{дт}} = k_{\text{т}} I_{\text{н}}^2 R_{\text{д}} \qquad (10.14)$$

- в компенсационной обмотке

$$P_{\text{кт}} = k_{\text{т}} I_{\text{н}}^2 R_{\text{к}} \qquad (10.15)$$

- в стабилизирующей обмотке

$$P_{\text{ст}} = k_{\text{т}} I_{\text{н}}^2 R_{\text{с}} \qquad (10.16)$$

- в обмотке возбуждения

$$P_{\text{вт}} = k_{\text{т}} I_{\text{в.н}}^2 R_{\text{в}} \qquad (10.17)$$

Расчетные значения потерь в обмотках принимают при номинальных токах якоря и возбуждения.

Для расчета потерь, отводимых охлаждающим внутренние объемы машины воздухом и наружной поверхностью машины, принимают, что через наружную поверхность отводится часть потерь обмоток возбуж-

дения, стабилизирующей, добавочных полюсов и компенсационной. Эти потери равны:

- при исполнениях по степени защиты и способу охлаждения IP22 IC01, IP22 IC17, IP44 IC37

$$P_{\text{нар}} = 0{,}1\left(P_{\text{вт}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{дт}} + P_{\text{кт}}\right) \quad (10.18)$$

- при исполнении IP44 IC0041

$$P_{\text{нар}} = 0{,}3\left(P_{\text{вт}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{дт}} + P_{\text{кт}}\right) \quad (10.19)$$

- при исполнении IP44 IC0141

$$P_{\text{нар}} = 0{,}4\left(P_{\text{вт}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{дт}} + P_{\text{кт}}\right) \quad (10.20)$$

Потери, отводимые охлаждающим воздухом из внутреннего объема машины, составляют

$$\Sigma P' = \Sigma P - P_{\text{нар}} \quad (10.21)$$

где $\Sigma P = P_1 - P_{\text{н}}$, а при исполнении IP44 $\Sigma P = P_1 - P_{\text{н}} - \Delta(P_{\text{тп}} + P_{\text{вент}})$.

При расчете среднего превышения температуры компенсационной обмотки необходимо учесть и добавочные потери, возникающие в полюсных наконечниках главных полюсов вследствие зубчатости наконечников. Эти потери ориентировочно равны

$$P_{\text{ст.п}} = k_{\Delta}[(k_{\delta\text{к}} - 1)B_{\delta} t_{\text{к}}]^2 \cdot \left(\frac{Zn}{10^4}\right)^{1{,}5} \frac{2pb_{\text{г}}l_{\text{г}}}{10^6} \quad (10.22)$$

где k_{Δ} - коэффициент, зависящий от толщины листа стали главного полюса: $k_{\Delta} = 1{,}5$ при толщине листа 0,5 мм, $k_{\Delta} = 2{,}8$ при толщине листа 1,0 мм, $k_{\Delta} = 4$ при толщине листа 1,5 мм;

$k_{\delta\text{к}}$ – коэффициент воздушного зазора полюсного наконечника;

$t_{\text{к}}$ – зубцовый шаг паза компенсационной обмотки;

$b_{\text{г}}$, $l_{\text{г}}$ – ширина и длина полюсного наконечника главного полюса.

Расчетные поверхности охлаждения тепловыделяющих поверхностей якоря, обмоток главных и добавочных полюсов зависят от выбранной системы охлаждения (радиальная или аксиальная) и формы и размеров охлаждающих каналов, образованных поверхностями охлаждения обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов.

Расчет поверхностей охлаждения производится по следующим формулам:

1) поверхность охлаждения якоря, м^2:

- при аксиальной вентиляции

$$S_a = (\pi D + n_к d_к)(l_a - 0{,}5\Sigma l_б) \quad (10.23)$$

где $n_к, d_к$ – число и диаметр аксиальных вентиляционных каналов якоря;

$\Sigma l_б$ – общая длина (по длине якоря) бандажа;

- при радиальной вентиляции

$$S_a = \pi D\left(l_a - 0{,}5\Sigma l_б - n_р d_р\right) \quad (10.24)$$

где $n_р, d_р$ – число и диаметр радиальных вентиляционных каналов.

2) поверхность охлаждения пазовой части обмотки якоря и компенсационной обмотки, м^2:

$$S_п = \Pi Z l_\delta k_c \quad (10.25)$$

где П – периметр поперечного сечения паза: для овального паза $\Pi = \pi(r_1 + r_2) + 2h_1$, для прямоугольного открытого паза $\Pi = 2(b_п + h_п)$;

$l_\delta k_c$ – длина магнитопровода якоря (для компенсационной обмотки – главного полюса);

3) поверхность охлаждения наружной поверхности лобовых частей обмотки якоря, м^2:

$$S_л = 2\pi D(l_{выл} - 0{,}3\Sigma l_{бл}) \quad (10.26)$$

где $l_{выл}$ – длина вылета лобовой части обмотки якоря: $l_{выл} = 0{,}3\tau$ при *2p=2* и $l_{выл} \approx 0{,}4\tau$ при *2p≥4*;

$\Sigma l_{бл}$- полная ширина бандажа лобовой части обмотки;

4) поверхность изоляции лобовых частей обмотки якоря, м^2:

$$2S_{из.л} = 2Z\Pi_{из.л} l_л \quad (10.27)$$

где $\Pi_{из.л}$ – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части: для овального полузакрытого паза $\Pi_{из.л} = \left(1 + \frac{\pi}{2}\right)(r_1 + r_2) + h_1$; для прямоугольного открытого паза $\Pi_{из.л} = 2(b_п + h_п)$;

$l_л$ – длина лобовой части обмотки якоря, м;

5) поверхность охлаждения лобовой части и компенсационной лобовой части компенсационной обмотки, м^2:

- для стержневой обмотки

$$S_{\text{к.л}} = 2pN_{\text{к}}l_{\text{к.л}}\left(b_{\text{к.д}} + h_{\text{к.д}}\right) \qquad (10.28)$$

- для катушечной (секционной) обмотки

$$S_{\text{к.л}} = 2pN_{\text{к}}l_{\text{к.л}}\left(2b_{\text{к.п}} + \frac{h_{\text{к.п}}}{2}\right) \qquad (10.29)$$

где $N_{\text{к}}$ – число стержней компенсационной обмотки на один полюс;

$b_{\text{к.д}}, h_{\text{к.д}}$ – ширина и высота дуги компенсационной обмотки;

$b_{\text{к.п}}, h_{\text{к.п}}$ – ширина и высота паза компенсационной обмотки;

6)поверхность охлаждения обмотки возбуждения, м^2:

$$S_{\text{в}} = l_{\text{в.ср}}\Pi_{\text{в}} \qquad (10.30)$$

где $l_{\text{в.ср}}$ – средняя длина витка обмотки возбуждения;

$\Pi_{\text{в}}$ – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения обмотки возбуждения.

Для определения периметра $\Pi_{\text{в}}$ применяют эскиз межполюсного окна (рис.10.3), по которому определяют длины участков контура поперечного сечения обмотки; поверхности, прилегающие к сердечнику главного полюса, не учитываются; поверхности, обращенные к каналам шириной менее 6 мм, учитываются с коэффициентом 0,5; поверхности, прилегающие к изоляционным рамкам, учитываются с коэффициентом 0,3. (Для рис.10.3 при определении периметра охлаждения обмотки возбуждения коэффициенты не применяются и $\Pi_{\text{в}} = d + (b_1 + b_2) + b_{\text{ср}}$);

6) поверхность охлаждения обмотки добавочных полюсов, м^2:

$$S_{\text{д}} = l_{\text{д.ср}}\Pi_{\text{д}} \qquad (10.31)$$

где расчет периметра поперечного сечения условной поверхности охлаждения добавочного полюса $\Pi_{\text{д}}$ производят так же, как и для обмотки возбуждения (по рис.10.3 - $\Pi_{\text{д}} = a + 0{,}3c$)

7) поверхность охлаждения коллектора, м^2:

$$S_{\text{к}} = \pi D_{\text{к}}l_{\text{к}} \qquad (10.32)$$

где $D_к$, $l_к$ – диаметр и длина коллектора;

8) расчетное значение наружной поверхности охлаждения двигателя, м^2:

$$S_{охл} = \pi D_н (l_\delta + 2l_{выл}) \qquad (10.33)$$

где $D_н$ – наружный диаметр станины, м;

$l_{выл}$ – вылет лобовых частей обмотки якоря, м.

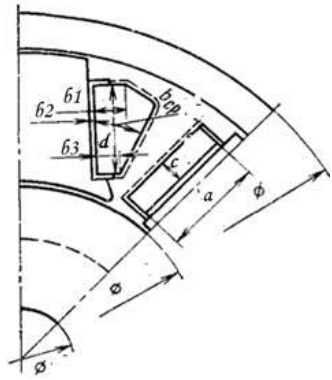


Рис. 10.3. Эскиз межполюсного окна двигателя (пунктиром показаны поверхности охлаждения обмоток)

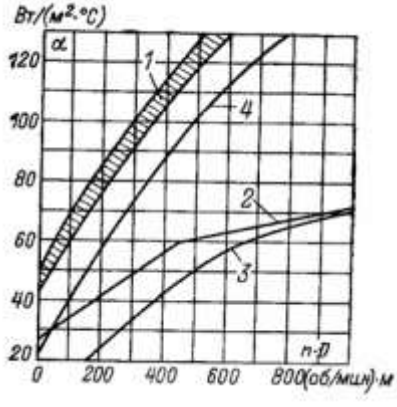


Рис. 10.4. Коэффициент теплоотдачи с поверхностей при аксиальной вентиляции (1 – якоря и лобовых частей обмоток якоря для исполнений IP22, IP44; 2 – обмоток параллельного возбуждения и добавочных полюсов; 3 – дуг компенсационной обмотки; 4 – полюсного наконечника главного полюса и воздушного зазора)

Коэффициент теплоотдачи с поверхности твердого тела зависит от характера течения охлаждающей среды, омывающей поверхность, конфигурации и размеров поверхности, характера покрытия и т.д.

Среднее значение коэффициентов теплоотдачи с расчетных поверхностей МПТ приведены на рис. 10.4 – 10.6.

Превышение температуры поверхности магнитопровода якоря над температурой воздуха внутри машины, °С

$$\Delta\vartheta_a = \frac{P_{aт}\left(\frac{2l_\delta}{l_{aср}}\right) + P_{ст}}{S_a \alpha_a} \qquad (10.34)$$

где α_a – коэффициент теплоотдачи по рис.10.4.

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей якоря, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{пов.л}} = \frac{P_{a\text{т}}\left(1-\frac{2l_\delta}{l_{a\text{ср}}}\right)}{2S_\text{л}\alpha_\text{л}} \qquad (10.35)$$

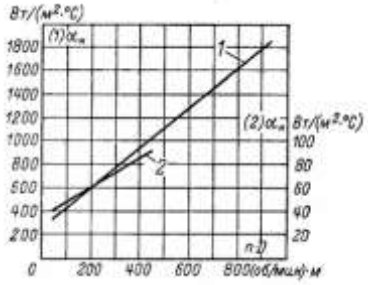


Рис.10.5. Минимальные значения коэффициента подогрева воздуха для исполнений и способов охлаждения машины: 1 – IP22 (IC01, IC37), IP44, IC37 при $D_\text{н} < 0{,}6$м; 2 - IP44, IC0141 при $D_\text{н} < 0{,}22$м

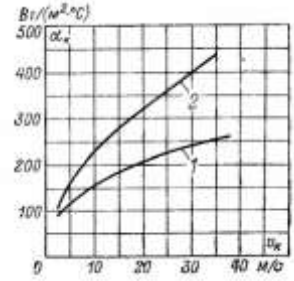


Рис.10.6. Коэффициенты теплоотдачи с поверхности коллектора (1 – без аксиальных каналов; 2 – с аксиальными каналами)

Перепад температуры в изоляции паза обмотки якоря, °С:

- для овальных полузакрытых пазов

$$\Delta\vartheta_{\text{из.п}} = \frac{P_{a\text{т}}\left(\frac{2l_a}{l_{a\text{ср}}}\right)}{S_\text{п}} \cdot \left(\frac{r_1+r_2}{8\lambda'_{\text{экв}}} + \frac{b_\text{из}}{\lambda_\text{экв}}\right) \qquad (10.36)$$

где r_1, r_2 – размеры паза;

$\lambda'_{\text{экв}}$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции секции из круглого провода: $\lambda'_{\text{экв}} \approx 1{,}4$ Вт/(м² · °С);

$\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции: для классов В, F, Н $\lambda_{\text{экв}} = 0{,}16$ Вт/(м² · °С);

- для открытых прямоугольных пазов $\frac{r_1+r_2}{8\lambda'_{\text{экв}}} = 0$.

Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки якоря, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{из.л}} = \frac{P_{a\text{т}}\left(1-\frac{2l_a}{l_{a\text{ср}}}\right)}{S_\text{пл}} \cdot \left(\frac{h_\text{п}}{8\lambda'_{\text{экв}}} + \frac{b_\text{из}}{\lambda_\text{экв}}\right) \qquad (10.37)$$

где $h_{\text{п}}$ – высота паза. Для якорей с жесткими секциями из прямоугольного провода $\frac{h_{\text{п}}}{8\lambda_{\text{экв}}'} \approx 0$; для якорей с всыпными обмотками без общей изоляции лобовых частей секции $\frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экв}}} \approx 0$.

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой охлаждающей среды, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{воз}} = \frac{\Sigma P'}{S_{\text{охл}}\alpha_{\text{н}}} \qquad (10.38)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент подогрева воздуха (рис. 10.5).

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды, °С

$$\Delta\vartheta_{a\text{ср}} = (\Delta\vartheta_a + \Delta\vartheta_{\text{из.п}})\frac{2l_\delta}{l_{a\text{ср}}} + (\Delta\vartheta_{\text{пов.л}} + \Delta\vartheta_{\text{из.л}}) \cdot \left(1 - \frac{2l_a}{l_{a\text{ср}}}\right) + \Delta\vartheta_{\text{воз}} \quad (10.39)$$

Превышение температуры наружной поверхности обмотки возбуждения, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{в}} = \frac{0{,}9P_{\text{в.т}}}{2pS_{\text{в}}\alpha_{\text{в}}} \qquad (10.40)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки возбуждения (рис.10.4).

Перепад температуры в изоляции многослойной катушки обмотки возбуждения, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{из.в}} = \frac{0{,}9P_{\text{в.т}}}{2pS_{\text{в}}}\left(\frac{b_{\text{в}}}{8\lambda_{\text{экв}}'} + \frac{b_{\text{из.в}}}{\lambda_{\text{экв}}}\right) \qquad (10.41)$$

где $b_{\text{в}}$ – средняя ширина катушки;

$\lambda_{\text{экв}}', \lambda_{\text{экв}}$ – принимаются как для изоляции обмотки якоря.

Для обмоток возбуждения, выполненных из провода прямоугольного сечения, составляющая $\frac{b_{\text{в}}}{8\lambda_{\text{экв}}'} \approx 0$.

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{в.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{в}} + \Delta\vartheta_{\text{из.в}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} \qquad (10.42)$$

Превышение температуры наружной поверхности обмотки добавочных полюсов над температурой воздуха внутри машины, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{п.д}} = \frac{0{,}9P_{\text{д.т}}}{2p_{\text{д}}S_{\text{д}}\alpha_{\text{д}}} \qquad (10.43)$$

где $\alpha_{\text{д}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности добавочного полюса: $\alpha_{\text{д}} = \alpha_{\text{в}}$.

Перепад температуры в изоляции многослойной обмотки добавочного полюса, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{из.д}} = \frac{0{,}9P_{\text{д.т}}}{2p_{\text{д}}S_{\text{д}}}\left(\frac{b_{\text{кт.д}}}{8\lambda_{\text{экв}}'} + \frac{b_{\text{из.д}}}{\lambda_{\text{экв}}}\right) \qquad (10.44)$$

где $b_{\text{кт.д}}$ – ширина обмотки добавочного полюса;

$\lambda_{\text{экв}}', \lambda_{\text{экв}}$ – принимаются как для изоляции обмотки якоря с полузакрытыми пазами;

для обмоток из прямоугольного провода $b_{\text{из.д}} = 0$.

Среднее превышение температуры обмотки добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{д.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{д}} + \Delta\vartheta_{\text{из.д}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} \qquad (10.45)$$

Превышение температуры поверхности полюсного наконечника главного полюса, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{к.п}} = \frac{P_{\text{к.т}}\left(\frac{2l_{\text{г}}}{l_{\text{к.ср}}}\right) + P_{\text{ст.п}}}{2pb_{\text{г}}l_{\text{г}}\alpha_{\text{г.п}}} \qquad (10.46)$$

где $\alpha_{\text{г.п}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности главного полюса (рис.10.4);

$b_{\text{г}}, l_{\text{г}}$ – ширина и длина полюсного наконечника главного полюса, м.

Перепад температуры в пазовой изоляции компенсационной обмотки, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{из.к}} = \frac{P_{\text{к.т}}\frac{2l_{\text{г}}}{l_{\text{к.ср}}}\Delta b_{\text{из.к}}}{2pZ_{\text{к}}\cdot 2(b_{\text{к.п}} + h_{\text{к.п}})l_{\text{г}}\lambda_{\text{экв}}} \qquad (10.47)$$

где $\Delta b_{\text{из.к}}$ – толщина пазовой изоляции компенсационной обмотки (табл. 4.1 – 4.3);

$b_{\text{к.п}}, h_{\text{к.п}}$ – ширина и высота паза компенсационной обмотки.

Превышение температуры лобовой части компенсационной обмотки над температурой воздуха внутри машины, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{к.л}} = \frac{P_{\text{к.т}}\left(1-\frac{2l_{\text{г}}}{l_{\text{к.ср}}}\right)}{S_{\text{к.л}}\alpha_{\text{д.к}}} \qquad (10.48)$$

где $\alpha_{\text{д.к}}$ – коэффициент теплоотдачи дуг компенсационной обмотки (рис.10.4).

Среднее превышение температуры компенсационной обмотки над температурой охлаждающего воздуха, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{к.ср}} = (\Delta\vartheta_{\text{к.п}} + \Delta\vartheta_{\text{из.к}})\frac{2l_{\text{к}}}{l_{\text{к.ср}}} + \Delta\vartheta_{\text{к.л}}\left(1-\frac{2l_{\text{г}}}{l_{\text{к.ср}}}\right) + \Delta\vartheta_{\text{воз}} \qquad (10.49)$$

Превышение температуры поверхности коллектора над температурой воздуха внутри машины, °С

$$\Delta\vartheta_{\text{к}} = \frac{\Delta\left(P_{\text{щ}}+P_{\text{т.щ}}\right)}{S_{\text{к}}\alpha_{\text{к}}} \qquad (10.50)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности коллектора (рис.10.6); потери в щеточном контакте определяются при расчете рабочих характеристик машины.

Среднее превышение температуры коллектора над температурой охлаждающей среды, °С:

- при входе охлаждающего воздуха со стороны, противоположной коллектору

$$\Delta\vartheta_{\text{к.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{к}} + 2\Delta\vartheta_{\text{воз}} \qquad (10.51)$$

- при входе охлаждающего воздуха со стороны коллектора

$$\Delta\vartheta_{\text{к.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{к}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} \qquad (10.52)$$

11. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ

При вентиляционном расчете машины определяют количество воздуха, которое необходимо ежесекундно прогонять через машину, и давление (напор), обеспечивающее прохождение требуемого количества охлаждающего агента. Одновременно вентиляционный расчет проводится в целях определения рациональной схемы вентиляции, при которой количество охлаждающего воздуха, омывающего рассматриваемую поверхность, не должно быть чрезмерным, а должно соответствовать количеству снимаемого с поверхности тепла и обеспечивать заданный уровень превышения температуры обмоток машины. При рас-

четах считают, что воздушный поток обычно отводит все тепло машины, за исключением механических потерь в подшипниках и наружном вентиляторе.

Расход воздуха, необходимый для охлаждения машины м^3/с:

$$Q_{\text{воз}} = \frac{\Sigma P'}{c_{\text{в}} \cdot 2\Delta\vartheta_{\text{воз}}} \qquad (11.1)$$

где $\Sigma P'$ — потери, отводимые воздухом, Вт;

$c_{\text{в}} = 1100$Дж/(°С·м^3) — удельная теплоемкость воздуха;

$\Delta\vartheta_{\text{воз}}$ – среднее превышение температуры воздуха внутри машины; при вентиляционном расчете принимается, что превышение температуры выходящего из машины воздуха над входящим в 2 раза больше среднего превышения температуры $\Delta\vartheta_{\text{воз}}$, т.е. $\Delta\vartheta_{\text{вых}} - \Delta\vartheta_{\text{вх}} = 2\Delta\vartheta_{\text{воз}}$.

Встроенный вентилятор, укрепленный на валу ЭМ, должен создавать напор, достаточный для того, чтобы обеспечить необходимый расход охлаждающей среды в каналах вентиляционной системы машины. Вентиляторы проектируются с учетом особенностей конструктивного исполнения конкретного типа машины. В серийных машинах общего назначения используют преимущественно центробежные вентиляторы с радиальными лопатками, рабочее колесо которых изменяет направление потока на радиальное.

Давление вентилятора, Па, необходимое для обеспечения заданного расхода воздуха

$$H = ZQ_{\text{воз}}^2 \qquad (11.2)$$

где Z – эквивалентное аэродинамическое сопротивление вентиляционного тракта машины; средние значения Z для МПТ серийного исполнения приведены на рис. 11.1.

Внешний диаметр вентиляторного колеса выбирают в соответствии с типом вентиляционной системы и конструкции машины. При аксиальной вентиляции внешний диаметр рабочего колеса D_2 (рис. 11.2) выбирают максимально возможным ($D_{2\text{в}} \approx 0{,}9d_c$).

По выбранному внешнему диаметру вентилятора определяют окружную скорость, м/с:

$$v_2 = \frac{\pi D_{2\text{в}} n}{60} \qquad (11.3)$$

Максимальное значение КПД вентилятора приблизительно соответствует режиму, когда номинальное давление вентилятора $H_{\text{н}} = 0{,}75H_0$,

где H_0 — давление, развиваемое вентилятором в режиме холостого хода, т. е. при закрытых отверстиях по внешнему диаметру, когда расход воздуха равен нулю.

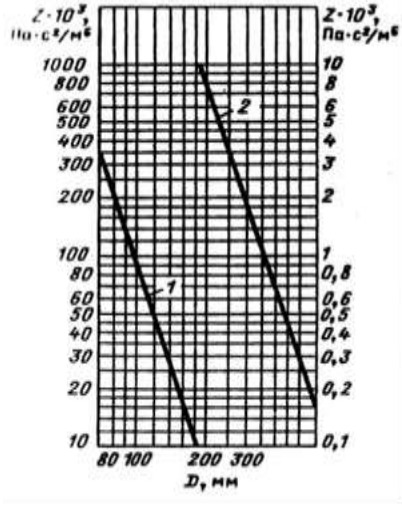


Рис. 11.1. Зависимость среднего значения аэродинамического сопротивления машины от диаметра якоря: *1* — якоря без аксиальных вентиляционных каналов; *2* — то же, с аксиальными каналами

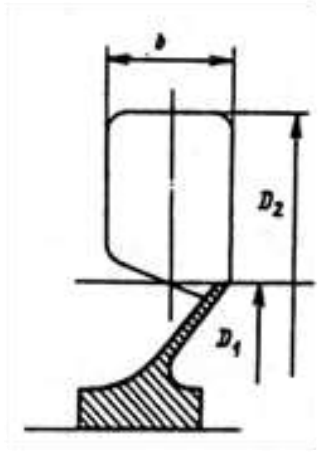


Рис. 11.2. Колесо вентилятора

Номинальное значение расхода воздуха приблизительно равно

$$Q_{\text{н}} \approx \frac{Q_{max}}{2} \qquad (11.4)$$

где Q_{max} — расход вентилятора, м^3/с, работающего в режиме короткого замыкания, т. е. в открытом пространстве.

Из условия максимального КПД принимается

$$Q_{max} = 2Q_{\text{н}} \qquad (11.5)$$

Сечение на выходной кромке вентилятора, м^2,

$$S_2 = \frac{60Q_{max}}{0{,}42\pi D_{2\text{в}}^2 n} \qquad (11.6)$$

где 0,42 — номинальный КПД радиального вентилятора.

Ширина колеса вентилятора

$$b = \frac{S_2}{0{,}92\pi D_{2в}} \qquad (11.7)$$

где 0,92 — коэффициент, учитывающий наличие вентиляционных лопаток на поверхности вентиляционной решетки (поверхности S_2).

Внутренний диаметр колеса $D_{1в}$ определяют из условия, что вентилятор работает при максимальном значении КПД, т. е. при $Q = 0{,}5Q_{max}$ и $H = 0{,}75H_0$.

Зная расход воздуха Q, сопротивление вентиляционной системы Z можно определить окружную скорость на внутренней кромке вентилятора:

$$v_1 = \sqrt{v_2^2 - \frac{ZQ^2}{0{,}75\rho\eta_a}} \qquad (11.8)$$

где η_a = 0,6 для радиальных лопаток; $\rho = 1{,}2$ кг/м^3 — плотность воздуха.

Внутренний диаметр колеса вентилятора, м:

$$D_{1в} = 60\frac{v_1}{\pi n} \qquad (11.9)$$

Во встроенных вентиляторах отношение $D_{2в}/D_{1в}$ лежит в пределах 1,2÷1,5.

Используя уравнения статического давления, развиваемого вентилятором, Па, найдем давление, развиваемое вентилятором при холостом ходе:

$$H_0 = \eta_a\rho(v_2^2 - v_1^2) \qquad (11.10)$$

Число лопаток вентилятора принимают:

$$N_л = (6 \div 10)\frac{D_{2в}}{D_{2в} - D_{1в}} \qquad (11.11)$$

Для уменьшения вентиляционного шума рекомендуется выбирать число лопаток вентилятора таким, чтобы оно равнялось нечетному числу. При вытяжной вентиляции могут быть рекомендованы и числа зависимости от диаметра вентилятора: при $D_{2в} = 200$ мм $N_л = 13$, при $D_{2в} = 250$ мм $N_л = 17$, при $D_{2в} = 300$ мм $N_л = 23$, при $D_{2в} = 350$ мм $N_л = 29$.

Число лопаток вентиляторов МПТ выбирают ориентировочно:

$$N_{\text{л}} = \frac{D_{2\text{в}}}{20} \qquad (11.12)$$

Значение $N_{\text{л}}$ округляют до ближайшего целого числа.

После расчета вентилятора необходимо уточнить результаты вентиляционного расчета.

Действительный расход воздуха

$$Q_{\text{воз}} = Q_{max}\sqrt{\frac{H_0}{H_0 + ZQ_{max}^2}} \qquad (11.13)$$

Действительный расход воздуха, рассчитанный по (11.13), должен быть равен необходимому расходу (11.1). Если нет, то изменяя ширину колеса вентилятора и диаметры необходимо обеспечить требуемый расход воздуха.

Мощность, потребляемая вентилятором, Вт

$$P_{\text{вент}} = \frac{HQ_{\text{воз}}}{\eta_{\text{э}}} \qquad (11.14)$$

где $\eta_{\text{э}} = 0{,}18 \div 0{,}2$ – энергетический КПД вентилятора.

12. ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ

Наряду с электромагнитными и тепловыми расчетами, механические расчеты во многом определяют энергетические, массогабаритные и виброакустические показатели, а также надежность и срок службы электрических машин. Поэтому расчеты узлов и отдельных деталей при проектировании электрических машин имеют важное значение.

Станина. В МПТ станина, кроме того, что к ней прикрепляют главные и добавочные полюсы, является частью магнитопровода. В целях уменьшения размеров подшипниковых щитов и повышения их жесткости иногда увеличивают длину станины. Развитая в сторону подшипниковых щитов часть станины может иметь меньшую толщину. Толщину станины определяют из электромагнитного расчета. Полученные размеры станины обеспечивают ее достаточную прочность и жесткость. В МПТ станины как при защищенном (степень защиты IP22), так и при закрытом исполнении (степень защиты IP44) (см. рис. 1.3) имеют гладкую внешнюю поверхность. При высотах оси вращения до 200 мм станины выполняют из цельнотянутых стальных труб, а при больших высотах оси вращения сваривают из толстолистовой стали, свернутой в трубу. Сварной шов целесообразно располагать по линии главных по-

люсов, чтобы исключить влияние этого шва на распределение магнитного потока. В удлиненных станинах предусматривают люки для обслуживания коллектора и подачи охлаждающего воздуха.

Для улучшения работы ДПТ при питании их от тиристорных преобразователей целесообразно магнитопровод статора выполнять шихтованным из листов электротехнической стали толщиной 0,5÷1 мм, а затем запрессовывать его в литой корпус.

При проектировании станины ЭМ в нижней ее части должны быть предусмотрены лапы, с помощью которых она крепится к фундаменту. Расположение лап на станине должно быть таким, чтобы можно было свободно вставлять в их отверстия крепящие машину болты, а в МПТ — еще и не затруднять установку и выем болтов, крепящих полюсы. Опорные лапы либо отливают вместе со станиной, либо изготовляют отдельно. Кроме того, на станине должны быть окна и приваренные или отлитые основания для размещения коробки вводных проводов.

В верхней части станины делают приливы или приваривают бобышки, в которых высверливают отверстия и нарезают резьбу для рым-болтов. В малых машинах делают один рым-болт, а у более крупных — два. При массе машины менее 30 кг рым-болт отсутствует. Станины должны иметь зажим для заземления.

При внешнем диаметре станины менее 1÷1,5 м к ее торцам болтами привертывают подшипниковые щиты, для чего на торцах должны быть выполнены кольцевые заточки для посадки и предусмотрены приливы или ушки с нарезными отверстиями для крепления щитов. При больших диаметрах станины применяют стояковые подшипники.

В последнее время получили распространение станины прямоугольной формы. Машина такой формы лучше вписывается в интерьер производственных помещений, гармонируя с прямыми линиями колонн, окон, станков и т. п. Кроме того, при прямоугольной форме станины удается лучше использовать ее внутренний объем и за счет этого уменьшить размеры машины.

Валы. ЭМ общего назначения выполняют преимущественно с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несет на себе всю массу вращающихся частей, через него передается вращающий момент машины. При сочленении машины с исполнительным механизмом (для двигателя) или с приводным двигателем (для генератора) через ременную или зубчатую передачу, а также и через муфту на вал действуют дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний.

Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал должен так же иметь достаточную жесткость, чтобы при работе машины ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины. При критической частоте вращения вынуждающая сила небаланса имеет частоту, равную частоте собственных поперечных колебаний вала (т. е. наступает явление резонанса), при которой резко увеличиваются прогиб вала и вибрация машины.

Валы изготовляют из углеродистых сталей, преимущественно из стали марки 45. Для повышения механических свойств сталей их подвергают термической обработке.

Размеры вала определяют при разработке конструкции. Валы имеют ступенчатую форму с большим диаметром в месте посадки магнитопровода ротора. Число ступеней вала зависит от количества узлов машины, размещаемых на нем (магнитопровод, коллектор, подшипники вентилятор и т. д.). При переходе с одного диаметра вала на другой, для предупреждения недопустимой концентрации напряжений, в местах переходов должны быть предусмотрены закругления (галтели) максимально возможного радиуса. Отношение радиуса галтели к диаметру вала должно быть больше 0,05. По этой же причине не следует применять отношение диаметров соседних ступеней вала более 1,3. Иногда для фиксации положения пакета магнитопровода ротора на валу предусматривается упорный буртик. Диаметр вала, см, в той его части, где размещается магнитопровод, предварительно можно выбрать по формуле

$$d_c = k_B \sqrt[3]{\frac{P_н}{n_н}} \qquad (12.1)$$

где $P_н, n_н$ — номинальные значения соответственно мощности, кВт, и частоты вращения, об/мин; k_B — коэффициент, значение которого следует принять равным 24÷29 для машины средней мощности и 18÷20 для крупных машин (от 400 кВт и выше).

Свободный конец вала имеет цилиндрическую или коническую форму. Широкое применение имеют валы с цилиндрическим концом. На этот конец насаживают полумуфту, или шкив, или шестерню, которые закрепляют с помощью шпонки. На валу имеется еще ряд шпонок для закрепления различных узлов, размещаемых на валу. В цепях упрощения обработки вала ширину всех шпонок желательно брать такой же, как и у свободного конца.

Размеры свободного конца вала (рис. 12.1) должны быть выбраны в соответствии с ГОСТ (табл. 12.1). Концы валов предусматриваются двух исполнений — длинные и короткие.

Таблица 12.1. **Цилиндрические концы валов**

d, мм	l_0, мм	
	Исполнение	
	1	2
7	16	—
9	20	—
11	23	—
14	30	—
16	40	28
18		
19		
22	50	36
24		
28	60	42
32	80	58
38		
42	100	82
48		
55		
60	140	105
65		
70		
75		
80	170	130
85		
90		
95		
100	210	165
110		
125		
140	250	200
150	250	210
160		
170	300	240
180		
190	350	280
200		
220		
250	410	330
280	470	380
320	550	450
360		

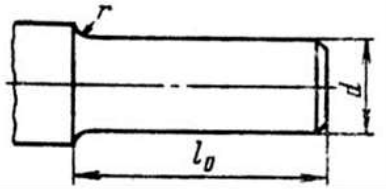


Рис. 12.1. Свободный конец вала

Шпонки для свободного конца вала выбирают по стандартам.

При конструировании вала следует также согласовать размеры шеек вала, на которых размещают подшипники, с размерами выбранных подшипников.

Подшипники. Подшипниковые щиты. В ЭМ с горизонтальным валом подшипники выполняют роль поддерживающих опор. Они воспринимают действия силы тяжести ротора, силы одностороннего притяжения, сил, возникающих от несбалансированности ротора и дополнительных продольных нагрузок от приводных механизмов. В машинах относительно небольшой мощности подшипники размещают в подшипниковых щитах, которые располагаются по торцам машины и предназначаются для прикрытия лобовых частей обмоток.

Подшипниковые щиты выполняют сварными и литыми, в средней части щитов выполняют сквозное цилиндрическое отверстие для подшипников. Щиты присоединяют к корпусу с помощью болтов.

Дня центровки относительно станины в верхней торцевой части щита делают кольцевой буртик. Если буртик подшипникового щита входит в расточку корпуса, то такое сочленение образует внутренний замок. При расположении буртика на наружной поверхности станины замок называется наружным.

В машинах защищенного исполнения в щитах выполняют окна дня прохождения охлаждающего воздуха. Если подшипниковый щит охватывает коллектор, то для доступа к щеткам в верхней его части делают проемы, закрываемые крышками. Для закрепления щита в станке при его обработке на нем делают специальные технологические приливы.

В машинах большой мощности при внешних диаметрах более 1 м подшипники выносят за корпус и устанавливают на специальных стояках. Стояковые подшипники крепят болтами к той же фундаментной плите, на которой установлен корпус. Во избежание появления подшипниковых токов один из стояков изолируют от фундаментной плиты изоляционной прокладкой, при этом с помощью изоляционных трубок и шайб изолируют также крепящие болты и штифты.

Подшипниковые токи, которые замыкаются по контуру вал — стояк подшипника — фундаментная плита — стояк подшипника — вал, приводят к коррозии поверхности подшипников, шеек вала и вызывают старение масла. Причиной появления этих токов является ЭДС, наводимая в вале от сцепленного с ним изменяющего во времени потока, вызванного магнитной несимметрией из-за наличия стыков между частями статора и сегментами, наличием шпоночных канавок, эксцентричным положением ротора и т. д. Появление подшипниковых токов наблюдается главным образом у машин относительно больших мощностей.

По конструктивным признакам подшипники подразделяют на подшипники качения (роликовые и шариковые подшипники) и подшипники скольжения. По роду воспринимаемой нагрузки различают опорные подшипники с радиальной нагрузкой и упорные подшипники с аксиальной нагрузкой, а по функциональным признакам — несущие и направляющие подшипники.

Подшипники качения. В машинах с горизонтальным расположением вала, в основном, применяют радиальные однорядные шарико- и роликоподшипники. Радиальные шарикоподшипники (рис. 12.2) могут кроме радиальной нагрузки воспринимать некоторую осевую нагрузку. При повышенном радиальном зазоре между шариками и дорожками качения колец подшипник приобретает свойства радиально-упорного подшипника и хорошо работает на восприятие больших осевых нагрузок. Поэтому в некоторых случаях (особенно в малых машинах) такие подшипники могут быть установлены в машинах с вертикальным расположением вала.

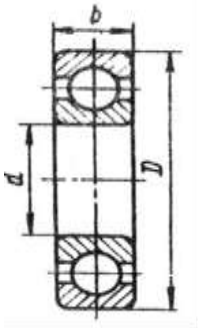


Рис. 12.2. Шарикоподшипник

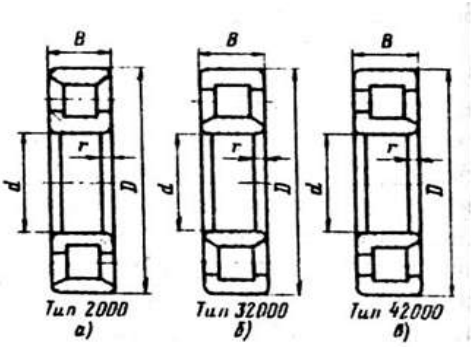


Рис. 12.3. Роликоподшипник

Роликоподшипники (рис. 12.3) применяют для больших нагрузок, чем это допустимо для шарикоподшипников. Подшипники, показанные на рис.12.3, *а* и *б*, могут воспринимать только радиальную нагрузку, а

подшипник на рис. 12.3, *в* кроме радиальной нагрузки может воспринимать небольшую осевую нагрузку в одном направлении. В машинах небольшой мощности при $h \leq 200$ мм чаще всего оба подшипника выбираются шариковыми. У машин средней и большой мощности подшипник со стороны привода, воспринимающий большую нагрузку, выбирается роликовым, а с противоположной стороны — шариковым.

От осевого перемещения на посадочных местах под действием осевой нагрузки кольца подшипников удерживаются при помощи выступа и гайки или специальной упорной пластинки, закрепляющейся на болтах в торце вала, или насаживаемым на вал кольцом. В машинах небольшой мощности обычно не делают фиксации внутреннего кольца шарикоподшипника на валу, а закрепляют лишь наружное его кольцо подшипниковой крышкой, являющейся одновременно деталью, удерживающей смазку подшипника. Если в машине применяются оба шариковых подшипника, то для возможности перемещения подшипника в осевом направлении при расширении вала у одного из них, а иногда и у обоих, следует предусмотреть зазоры между крышками и наружным кольцом (рис. 12.4).

Подшипники катящегося трения смазываются преимущественно консистентными смазками. Смазка служит для обеспечения коррозийной стойкости подшипников, распределения и отвода тепла, снижения потерь энергии за счет предотвращения сухого трения, уменьшения шума, защиты от попадания грязи. Рабочее пространство подшипникового узла заполняется смазкой не более чем на 2/3 объема. Выбор консистентной смазки проводится на основании данных об условиях работы подшипников.

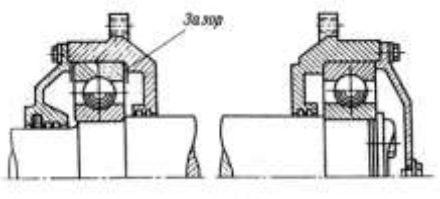


Рис. 12.4. Подшипниковые узлы с шарикоподшипниками

Дня нормальной работы подшипников необходимо предусмотреть уплотнения подшипниковых узлов, защищающих их от пыли, грязи, а также препятствующих вытеканию смазки в полость машины. Применяются различные конструкции уплотнений: фетровые, кольцевые зазоры, манжетные, лабиринтные и др.

При больших частотах вращения (когда $dn > 300$, где n — частота вращения, об/мин, d — диаметр вала, м) для смазки подшипников применяют минеральные масла.

При проектировании машины перед конструктором ставится задача выбора по каталогу типа подшипника, соответствующего нагрузке и условиям их работы (приложение 5). Диаметр внутреннего кольца выбранного подшипника должен быть равен диаметру цапфы (цапфа — часть вала, на которую горячей посадкой насаживается подшипник).

Для подбора конструкции, типа и размера подшипника необходимо знать: 1) значение и направление действующих на подшипник нагрузок; 2) характер нагрузки (спокойная, ударная, переменная); 3) диаметр цапфы, на которую сажается подшипник; 4) частоту вращения машины; 5) желательный срок службы подшипника.

Подбор подшипников рекомендуется производить, начиная с легкой серии.

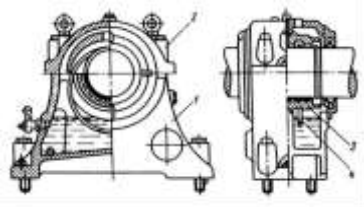


Рис. 12.5. Стояковый подшипник с кольцевой смазкой

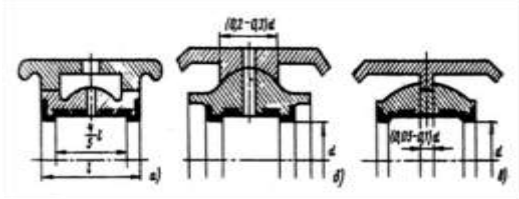


Рис. 12.6. Посадки вкладышей в корпусе подшипника: *а* — жесткая; *б* — сферическая; *в* — узкоцилиндрическая

Подшипники скольжения. В настоящее время подшипники скольжения применяют главным образом для крупных ЭМ и выполняют в виде стояковых подшипников (рис. 12.5). Корпус подшипника изготовляется из чугуна. В корпус входят стояк *1* и верхняя крышка *2*. Основным элементом подшипника являете вкладыш *3* — втулка, разрезанная по образующей на две половины. В его верхней половине выполняют одно или два отверстия для смазочных колец *4*. Вкладыши изготовляются из стали, чугуна, бронзы и других материалов. Толщина вкладышей принимаете равной $s = (0{,}05d + 5) \div (0{,}1d + 5)$ мм, где d — диаметр цапфы. Внутренняя поверхность вкладыша, охватывающая цапфу вала, заливается антифрикционным белым сплавом — баббитом. Для улучшения связи между баббитом и вкладышем последний имеет кольцевые канавки в виде ласточкина хвоста. Толщина слоя заливки в зависимости от диаметра вкладыша равна 2÷8 мм. Посадка вкладышей и корпус

подшипников выполняется жесткой или самоустанавливающейся (рис. 12.6). При жесткой посадке вкладыш фиксируется в гнезде, при самоустанавливающейся он опирается на шаровые опоры и может занимать положение в своих гнездах соответственно прогибу или перекосу вала.

Для предотвращения попадания масла в машину и вытекания его из подшипника в месте выхода из стояка помещают лабиринтные уплотнения и маслоулавливающие кольца.

Отдельные элементы подшипников скольжения стандартизированы.

Выбор подшипника скольжения проводят по табл. 12.2, исходя из нагрузки на подшипник. Указанные в таблице размеры вкладыша подшипника означают его внутренний диаметр и длину. В таблице приведена ступенчатая линия, которая разграничивает подшипники с кольцевой смазкой (выше линии) и подшипники, требующие принудительной смазки.

Таблица 12.2. **Допускаемые нагрузки на подшипники с кольцевой смазкой, кН**

Размеры, мм	Частота вращения, об/мин													
	125	150	167	187	214	250	300	375	428	500	600	750	1000	1500
100×130	—	—	—	—	—	—	—	—	9	10	11	12	14	16
110×130	—	—	—	—	—	—	—	10	11	12	13	14	16	19
120×140	—	—	—	—	—	—	—	12,5	13,5	14,5	15,5	17	20	24
130×140	—	—	—	—	—	—	13	14	15	16	17,5	19	22,5	26
140×150	—	—	—	—	—	—	14,5	16,5	17,5	18,5	20,5	22,5	26	30
150×150	—	—	—	—	—	—	16	18	19	20,5	22,5	24	28	32,5
160×160	—	—	—	—	—	—	18,5	20,5	22	23,5	25,5	28	32	—
180×180	—	—	—	—	—	22	24,5	27	29	31	33,5	37	42	—
200×200	—	—	—	—	26,5	29	31,5	34,5	36,5	39	42	47	53	—
220×220	—	—	—	31,5	33,5	36,5	39,5	43	46	48,5	54	59	66	—
250×250	—	—	32,5	44	46,5	49,5	53,5	58	61	66	72	79	—	—
280×280	—	53,5	55,5	58	61	66	71,5	77,5	82	87,5	94	104	—	—
300×300	—	63	66	69	73	78	84,5	91	97	103	11	122,5	—	—
350×350	85	91	95,5	100	105	114	122	134	140	150	160	—	—	—
400×400	115	125	130	136	144	155	166	182	190	208	224	—	—	—
450×450	155	165	173	180	190	205	220	241	256	273	—	—	—	—
500×500	200	205	223	232	246	265	290	320	340	—	—	—	—	—

Полюсы. На полюсах ЭМ располагается обмотка возбуждения, которая создает магнитный поток. Необходимый характер распределения этого потока в воздушном зазоре обеспечивается соответствующей конфигурацией полюсного наконечника. Как правило, полюсы МПТ размещаются на статоре. В МПТ кроме главных полюсов на статоре размещаются добавочные, предназначенные для улучшения коммутации.

Главные полюсы МПТ (рис. 12.7) собирают из отдельных листов, которые штампуют из электротехнической стали толщиной 1 мм. Собранные в пакет, они спрессовываются при давлении $(20 \div 25) \cdot 10^5$ Па и скрепляются заклепками. Крайние листы пакета выполняются более

толстыми. В зависимости от размера полюса они штампуются из листовой стали толщиной 4÷10 мм. Эти листы по размеру делаются несколько меньшими, чем остальные.

Заклепки вставляются в предусмотренные в листах отверстия, а затем развальцовываются в конических углублениях листов (см. рис. 12.7).

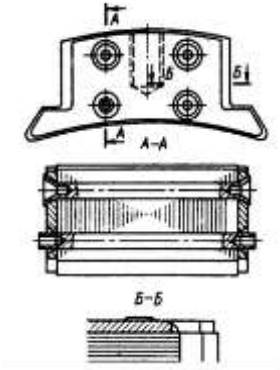


Рис. 12.7. Главный полюс машины постоянного тока

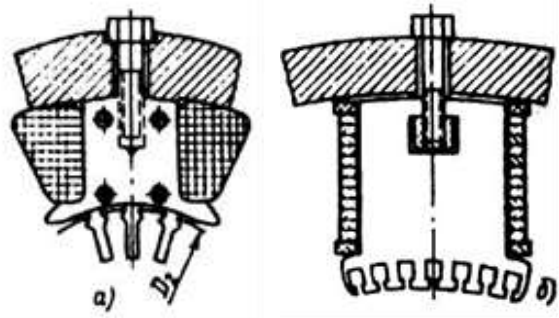


Рис. 12.8. Крепление главного полюса к станине

Они равномерно распределяются по поверхности листов и занимают около (2÷3)% этой поверхности. Обычно их не менее четырех. Диаметры отверстий под клепки принимаются на 0,15÷0,2 мм больше диаметра самой заклепки. Для полюсов применяются заклепки диаметром 6, 8, 10 и 12 мм.

Полюсы прикрепляются к станине болтами. Для этого в теле шихтованного полюса высверливаются отверстия, и нарезается резьба (рис. 12.8, *а*). Резьба в шихтованном теле полюса механически ненадежна и не всегда обеспечивает плотное прилегание полюса станине. Поэтому в более крупных машинах, а также у маши, работающих в условиях тряски, болты вворачиваются в стержни, вставляемые в тело полюса (рис. 12.8, *б*).

В крупных машинах постоянного тока в полюсных наконечниках выштамповываются пазы для размещения компенсационной обмотки (рис. 12.8, *б*).

Добавочные полюсы выполняются цельными или собранными из штампованных стальных листов. В машинах относительно небольшой мощности добавочные полюсы выполняются в виде стальных отливок или из полос проката. В настоящее время они часто собираются из листовой стали толщиной 1 мм. На рис. 12.9 даны различные исполнения

добавочных полюсов. Сердечник полюса и его наконечник (рис. 12.9, *а*) выполняются из одной заготовки путем ее последующей обработки. Полочки (рис. 12.9, *б* и *г*), служащие для поддержания катушек, выполняются из немагнитных материалов и прикрепляются заклепками к телу полюса. В машинах относительно большой мощности полюсы выполняются Т-образной формы (рис. 12.9, *в*), при таком их выполнении увеличивается поверхность прилегания полюса к станине и уменьшается индукция в стыке. Полюсы, собранные из отдельных листов, имеют преимущество перед массивными, так как в них уменьшается действие вихревых токов при переходных процессах, что способствует улучшению коммутации.

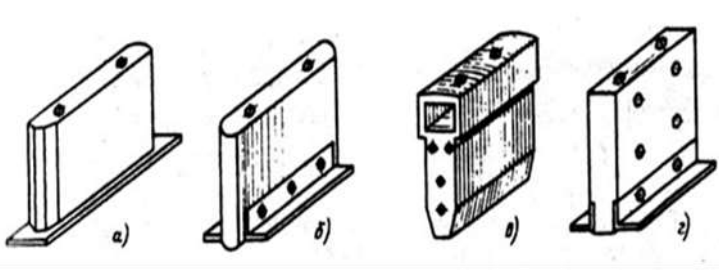


Рис. 12.9. Добавочные полюсы машин постоянного тока

В целях унификации болтов для крепления главных и добавочных полюсов при небольшой разнице в их диаметрах принимают одинаковыми.

Якорь. Магнитопроводы якорей МПТ с внешним диаметром менее 990 мм собирают из целых листов, которые вырубаются из электротехнической стали толщиной 0,5 мм (рис. 12.10). В листе штампуют пазы, а при необходимости, кроме того, круглые отверстия диаметр 15÷35 мм для образования вентиляционных каналов. При большой радиальной высоте листа отверстия располагают в несколько концентрических рядов в шахматном порядке. Для посадки магнитопровода на вал в центре листа штампуются отверстие, в котором предусматривается шпоночная канавка, а также круглая лунка — шихтовочный знак *А*, для того чтобы при шихтовке укладывать все листы в одно и то же положение относительно друг друга. В результате такой укладки пазы получаются с более ровными стенками. После штамповки и снятия заусенцев листы лакируют и подвергают термообработке для создания оксидной пленки. При внешних диаметрах ротора до 200÷300 мм магнитопроводы сажают на гладкий вал горячей посадкой, а при больших диаметрах на валу предусматривается шпонка.

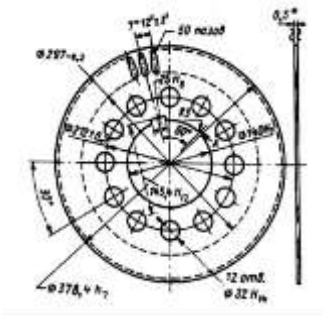


Рис. 12.10. Пример листа магнитопровода ротора

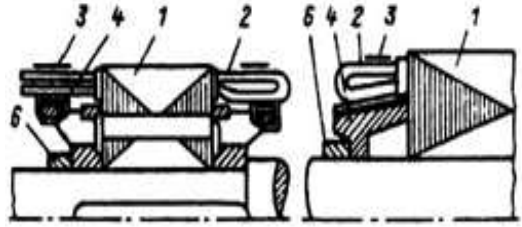


Рис. 12.11. Якорь из целых листов

Магнитопроводы якорей МПТ набирают из листов непосредственно на вал (рис. 12.11). Магнитопроводы *1* спрессовывают стальными нажимными шайбами, которые имеют кольцевые пояса *4*, называемые обмоткодержателями и предназначенные для поддержки лобовых частей обмотки *2*. Выполнение обмоткодержателей выбирается в соответствии с формой лобовых частей обмотки.

Магнитопровод якоря в спрессованном состоянии фиксируется на валу в осевом направлении или с помощью втулок *6*, насаживаемых на вал с большим натягом. Иногда для фиксации магнитопровод с одной стороны упирается в предусмотренный на валу буртик. Лобовые части обмотки закрепляют бандажом *3*.

При внешнем диаметре якоря более 990 мм магнитопровод набирается из штампованных сегментов электротехнической стали (рис. 12.12). В этом случае сегменты набирают на ступицах, которые имеют сварную конструкцию (рис. 12.13). Размеры сегментов выбирают исходя из наилучшего раскроя листа. Для крепления в ступице в сегментах с внутренней стороны предусматривают выступы или углубления в форме ласточкина хвоста. Количество крепящих элементов в каждом сегменте должно быть не менее двух. В целях повышения механической прочности, а также улучшения магнитной проводимости пакеты собирают с перекрытием сегментов при переходе от слоя к слою.

В осевом направлении сегменты якоря стягивают над фланцами и стяжными шпильками, устанавливаемыми внутри вне магнитопровода.

Иногда на ступицах собирают магнитопроводы роторов (якорей) при их диаметрах менее 990 мм. Такое выполнение магнитопроводов целесообразно в том случае, когда разность между внутренним диамет-

ром якоря, найденным из электромагнитного расчета, и диаметром вала получается значительной.

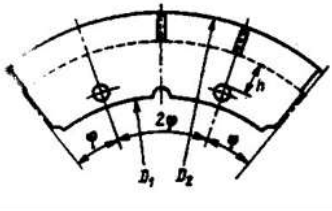


Рис. 12.12. Сегмент якоря

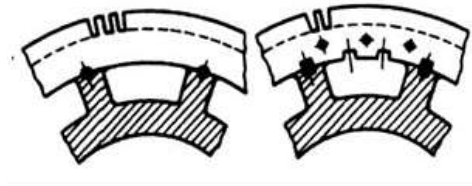


Рис. 12.13. Якорь из сегментов

При проектировании якорей отдельные их элементы подлежат проверке на механическую прочность.

В пазах якорей располагаются обмотки, на которые при вращении действуют центробежные силы. Для предотвращения перемещения в радиальном направлении обмотки должны быть надежно закреплены.

Лобовые части обмоток закрепляют бандажами, намотанными из проволоки или стекловолокна. Закрепление пазовой части обмотки посредством бандажей можно применять для МПТ относительно небольшой мощности (при диаметрах якоря до 300÷350 мм), имеющих открытые пазы. Бандажи располагают в специальных канавках магнитопровода, которые образуются в результате применения листов меньшего диаметра, чем основные (рис. 12.14).

Рис. 12.14. Якорь машины постоянного тока с креплением обмотки бандажами

Применение бандажей имеет определенные преимущества, так как при этом уменьшается высота зубца, что приводит к уменьшению магнитного напряжения зубцов и потерь при их перемагничивании. Однако при больших скоростях (при v_a > 35 м/с) применение бандажей становится нерациональным, так как бандажи перекрывают чрезмерно большую поверхность якоря, что ухудшает его отдачу. При наличии проволочных бандажей из-за потерь в них понижается КПД машины, а при бандажах из магнитной проволоки ухудшается коммутация. При наличии кольцевых канавок увеличивается воздушный зазор, а, следо-

вательно, и магнитное напряжение зазора. Поэтому у более мощных МПТ, имеющих на якоре полузакрытые пазы, крепление обмоток в активной части производят клиньями.

Для бандажей применяют магнитную или стальную немагнитную проволоку или стеклоленту. При частотах перемагничивания более 50 Гц и в напряженных по коммутации машинах на активной части преимущественно применяют немагнитную проволоку. Диаметр проволоки для бандажей предварительно выбирают в пределах 0,8÷2,0 мм (меньшие диаметры проволоки берут для машины с меньшим диаметром якоря).

Для уменьшения потерь бандаж делят на части, для чего по длине магнитопровода делают несколько канавок. Длину каждой канавки следует принимать не более 15÷20 мм, а общая длина всех канавок не должна превышать 35% длины магнитопровода. На лобовых частях обмотки ширина бандажей может достигать 40 мм. Более широкие бандажи также следует делить на части или применять укладку в несколько слоев по высоте.

Под проволочными бандажами на пазовой и лобовой частях обмотки якоря подкладывают миканит толщиной 0,3÷0,4 мм. Внешний диаметр установленных бандажей не должен превышать внешнего диаметра якоря. Для укрепления бандажей по ширине применяют скрепки из белой жести шириной 8÷15 мм, припаиваемые оловянным припоем.

По сравнению с проволочными бандажи из стеклоленты, пропитанной синтетическими смолами, имеют преимущества. У них нет собственных потерь, они не требуют наложения изоляции между бандажом и обмоткой, менее трудоемки в изготовлении. Недостатком таких бандажей является их большая толщина, так как стеклолента имеет меньшую механическую прочность.

Клинья изготовляют из гетинакса, текстолита, стеклотекстолита и дерева (бука, клена, ясеня).

Коллектор. Коллектор является ответственной и сложной частью МПТ. Он состоит из коллекторных пластин, которые изготовляют из твердотянутой меди трапецеидального сечения толщиной 3÷15 мм. Иногда для повышения механической прочности применяют пластины из меди с присадкой кадмия. Для изоляции медных пластин друг от друга между ними укладывают прокладки из специального коллекторного миканита толщиной 0,8÷1,5мм. Набор коллекторных пластин с изоляцией между ними должен быть прочно закреплен и иметь строго цилиндрическую форму при любых режимах работы машины. Существующие конструкции коллекторов различают по способу крепления пластин и имеют большое многообразие. Здесь рассматриваются наиболее употребляемые в современных машинах способы крепления: нажимными конусными фланцами и конструкционной пластмассой.

При креплении нажимными конусными фланцами коллекторные пластины выполняют в виде ласточкина хвоста. Изоляционные прокладки между пластинами — такой же формы. Коллекторы с креплением нажимными конусными фланцами делят на арочные и клиновидные. В первом случае нажим на пластины осуществляется только на ласточкин хвост (рис. 12.15, *а*), во втором — на ласточкин хвост и концы пластин (рис. 12.15, *б*).

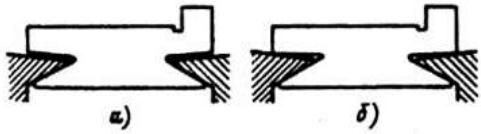


Рис. 12.15. Способы крепления коллекторных пластин

Наибольшее распространение получили арочные коллекторы, как более технологичные. На рис. 12.16 и 12.17 показаны конструкции таких коллекторов.

Ни рис. 12.16 нажимные фланцы *1,* надетые на втулку *2,* стягиваются кольцевой гайкой *3.* Для изоляции всех коллекторных пластин от корпуса на нажимные фланцы надевают прессованные из миканита манжеты *4,* а на втулку — миканитовый цилиндр *5*. Со стороны якоря у коллекторной пластины имеется выступ *6,* называемый петушком, в котором выфрезеровывается шлиц. В этот шлиц закладывают, а затем припаивают проводники обмотки якоря.

Рассмотренную конструкцию применяют при диаметрах коллекторов до 200÷250 мм и малой длине. В коллекторах с общей длиной более 200 мм не рекомендуется применять затяжку фланцев кольцевой гайкой, так как в этом случае при нагреве пластин из-за температурной деформации происходит бочкообразный выгиб пластин.

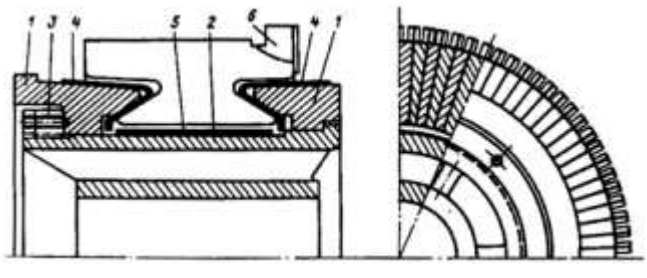


Рис. 12.16. Коллектор малых машин

Пример конструкции коллекторов с большими диаметрами показан на рис. 12.17. Здесь нажимные фланцы *1* стягивают стальными шпильками *2*. На фланцы надевают миканитовые манжеты *3*. При большой разнице в диаметрах якоря и коллектора в шлиц пластины впаивают медные полоски *4* — петушки, к которым присоединяют проводники якоря.

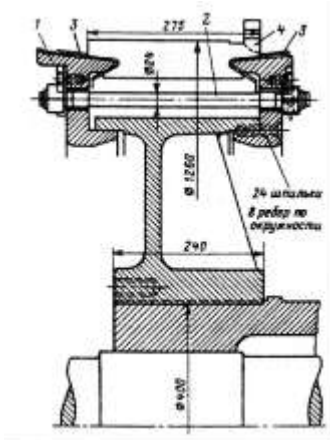


Рис. 12.17. Коллектор крупных машин

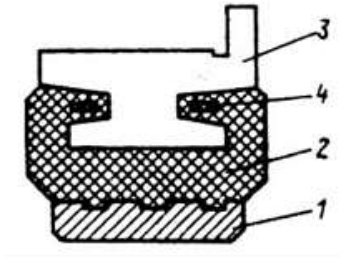


Рис. 12.18. Коллектор на пластмассе

В коллекторах относительно небольших размеров (с внешним диаметром до 40÷50 см) в настоящее время находит широкое применение крепление пластин пластмассами (рис. 12.18). По сравнению с креплением нажимными фланцами такие коллекторы более надежны в эксплуатации в отношении сохранения правильной цилиндрической формы, имеют меньшую трудоемкость изготовления и себестоимость за счет отсутствия механической обработки пластин на станке. Для посадки коллектора на вал внутри его предусматривают стальную втулку *1*, в которой для лучшего сцепления с пластмассой проточены кольцевые канавки. Пластмассу *2* впрессовывают в пространство между втулкой и коллекторными пластинами. Для этого применяют пластмассу марки К6 или АГ-4. В целях повышения механической прочности в углубления коллекторных пластин 3 вкладывают армировочные кольца *4,* выполненные из стальной проволоки или полосы. Размеры колец и число их витков зависят от диаметра коллектора. Показанная на рис. 12.18 конструкция коллектора применяется при их диаметрах до 25 см.

Внешний диаметр коллектора $D_к$, его общую длину $l_к$ и ширину коллекторного деления $b_к$ определяют из электромагнитного расчета. Ниже даны некоторые соотношения, позволяющие выбрать размеры коллекторных пластин (рис. 12.19).

Высоту коллекторной пластины принимают равной:

$$h_к \approx (0{,}8 \div 1{,}15)\sqrt{D_к} \qquad (12.2)$$

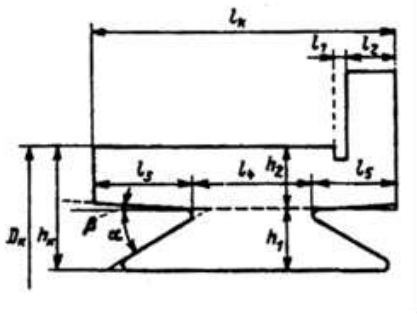


Рис. 12.19. Коллекторная пластина

Высота ласточкина хвоста

$$h_1 \approx (0{,}5 \div 0{,}55)h_к \qquad (12.3)$$

Дня равномерного распределения центробежных сил ласточкины хвосты стараются располагать несимметрично: $l_3 > l_5$. При выборе длины l_4 можно исходить из соотношения

$$l_4 \geq (1{,}2 \div 1{,}6)h_1 \qquad (12.4)$$

Ширину выточки l_1, нужной для выхода шлифовального круга и фрезы при продорожке изоляции между пластинами, берут равной 6÷8 мм.

Размер l_2 выбирается для якорей с многовитковыми секциями равной 12÷15 мм, а для якорей с одновитковыми секциями 15÷20 мм.

Толщина миканитовых манжет равна 1÷1,5 мм, а миканитового цилиндра 0,75÷1 мм.

Профиль ласточкина хвоста задается углами α и β, которые обычно применяются равными соответственно 30 и 3°. При диаметре коллектора менее 15 см эти углы принимаются равными 45 и 3°. Число шпилек для стягивания нажимных фланцев зависит от диаметра кол-

лектора. При $D_к$ менее 50 см число шпилек выбирается в пределах от 6 до 12. Диаметр шпилек не рекомендуется брать менее 16 мм.

Токосъемный аппарат. Токосъемный аппарат, предназначенный для съема тока с коллектора, состоит из щеток, щеткодержателей, щеточных пальцев и траверсы. На рис. 12.20 показаны некоторые из возможных конструкций щеткодержателей.

Щетки для ЭМ прессуют из угольных и графитных порошков. Электрические свойства щеток и стандартизованные их размеры приведены в приложении 4. Для отвода тока в щетки заделываются гибкие плетеные канатики *4*, которые вторыми своими концами посредством припаянных к ним наконечников соединяют к неподвижной части щеткодержателя. Щетки *2* устанавливают в обойму щеткодержателя *1*. Щеткодержатели выполняют из латуни литыми или штампованными. Для того чтобы осуществить плотный контакт с коллектором или контактными кольцам на щетки с помощью пружины *3* осуществляется давление, которое выбирается равным 0,02÷0,04 МПа. Щеткодержатели укрепляют на щеточных пальцах с помощью колодок *5*. На щеточном пальце обычно размещают несколько щеткодержателей. Наиболее распространенным видом щеткодержателей являются радиальные (рис. 12.20, *а*), у них направление щетки совпадает с продолжением радиуса коллектора. Такие щеткодержатели применяют для реверсивных машин, так как условия работы щеток не зависят от направления вращения. На рис. 12.21 показана еще одна конструкция радиального щеткодержателя.

Для машин одностороннего вращения чаще находят применение реактивные щеткодержатели (см. рис. 12.20, *б*), достоинство которых заключается в том, что при определенном нажиме и угле наклона щетка не упирается в обойму и скользит в ней без трения.

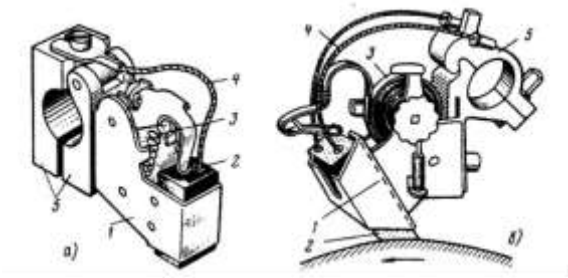


Рис. 12.20. Щеткодержатели машин постоянного тока: *а* — радиальный; *б* — реактивный

В МПТ щеточные пальцы крепят к траверсе, являющейся несущей конструкцией всего узла токосъема. Траверса должна иметь возмож-

ность перемещения по окружности в целях установки щеток на геометрическую нейтраль при сборке и наладке машины. На рис. 12.22 показана одна из возможных конструкций траверсы, которая применяется для машин относительно небольших мощностей. Траверсу закрепляют на специальной заточке подшипникового щита стяжными и стопорными болтами.

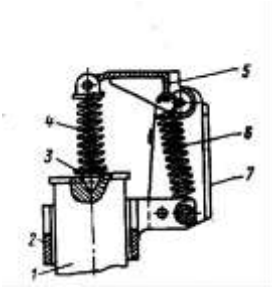


Рис. 12.31. Радиальный щеткодержатель *1* — щетка; *2* — щеткодержатель; *3* — фарфоровый наконечник; *4* — пружина; *5* — рычаг; *6* — нажимная пружина; *7* — корпус щеткодержателя

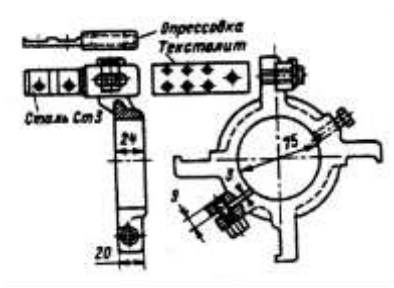


Рис. 12.32. Траверса

Пальцы, на которых укрепляют щеткодержатели, представляют собой цилиндрические или призматические стержни. Второе исполнение встречается чаще, так как оно проще в производстве и лучше фиксирует положение щеток. Призматические пальцы выполняют из гетинакса или текстолита либо из полосы стали, спрессованной в месте крепления с траверсой. Цилиндрические пальцы изолируют от траверсы миканитовыми втулками и шайбами или спрессовывают пластмассой. Число пальцев в машине обычно равно числу полюсов. Щеточные пальцы одинаковой полярности соединяют между собой медными шинами или проводами.

Иногда у МПТ применяется также крепление щеточных пальцев непосредственно к подшипниковому щиту. Такое крепление принято, например, у машин серии 2П с высотой оси вращения $h = 355 \div 500$ мм.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задание на проект и исходные данные

Рассчитать и разработать конструкцию двигателя постоянного тока со следующими данными:

мощность $P_н = 7{,}5$ кВт;

номинальное напряжение сети $U_н = 220$В;

номинальная частота вращения $n_н = 1500 \frac{об}{мин}$;

возбуждение параллельное без стабилизирующей обмотки;

исполнение по степени защиты IP22, по способу охлаждения – самовентиляция (IC01);

режим работы – продолжительный;

изоляция класса нагревостойкости В.

Конструкция двигателя должна соответствовать требованиям ГОСТ на установочные размеры и размеры выступающего конца вала (ГОСТ 13267-73), а также общим техническим требованиям на машины электрические (ГОСТ 183-74). За основу конструкции принимается машина постоянного тока серии П или 2П.

Выбор главных размеров

1. Высота оси вращения (приложение 1): $h = 160 \cdot 10^{-3}$ м.
2. Предварительное значение КПД электродвигателя (по рис. 2.3): $\eta = 84\%$.
3. Ток электродвигателя (предварительное значение):

$$I_н = \frac{P_н}{\eta U_н} = \frac{7{,}5 \cdot 10^3}{0{,}84 \cdot 220} = 40{,}6 \text{ А}.$$

4. Ток якоря, принимая ток в параллельной обмотке согласно табл.2.1, равным около $0{,}025 I_н$ ($k_В = 0{,}025$):

$$I = 0{,}975\, I_н = 0{,}975 \cdot 40{,}6 = 39{,}6 \text{ А}.$$

5. Электромагнитная мощность по (2.6):

$$P' = P_н \frac{1+\eta}{2\eta} = 7{,}5 \cdot 10^3 \frac{1 + 0{,}84}{2 \cdot 0{,}84} = 8214 \text{ Вт}.$$

6. Наружный диаметр корпуса машины по (2.2):

$$D_н = 2h - (8 \div 10) \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 160 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3} = 312 \cdot 10^{-3} \text{м}.$$

7. Диаметр якоря с учетом рис. 2.1: $D = 156 \cdot 10^{-3}$м.
8. Линейная нагрузка якоря (по рис.2.5): $A' = 2 \cdot 10^4$А/м.

9. Индукция в воздушном зазоре (по рис.2.6): B_δ =0,65 Тл.

10. Расчетный коэффициент полюсной дуги (по рис.2.4): $\alpha_\delta = 0{,}64$.

11. Расчетная длина якоря:

$$l_\delta{}' = \frac{6{,}1P'}{\alpha_\delta A' B_\delta D^2 n_н} = \frac{6{,}1 \cdot 8214}{0{,}64 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0{,}65 \cdot (156 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1500} = 165 \cdot 10^{-3}\text{м}.$$

При отсутствии радиальных вентиляционных каналов $l_\delta{}'$ равна полной длине сердечника якоря: $l_\delta{}' = l_п = 165 \cdot 10^{-3}$м.

12. Отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру:

$$\lambda = \frac{l_\delta{}'}{D} = \frac{165 \cdot 10^{-3}}{156 \cdot 10^{-3}} = 1{,}06.$$

13. Число полюсов принимаем $2p = 4$.

14. Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3}}{4} = 122 \cdot 10^{-3}\text{м}.$$

15. Расчетная ширина полюсного наконечника:

$$b_\delta = \alpha_\delta \tau = 0{,}64 \cdot 122 \cdot 10^{-3} = 78 \cdot 10^{-3}\text{м}.$$

16. Действительная ширина полюсного наконечника при эксцентричном зазоре равна расчетной ширине: $b_р = b_\delta = 78 \cdot 10^{-3}$м.

Выбор обмотки якоря

17. Выбираем простую волновую обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 2$.

18. Ток параллельной ветви:

$$I_a = \frac{I}{2a} = \frac{39{,}6}{2} = 19{,}8 \text{ А}.$$

19. Предварительное общее число эффективных проводников по (3.8):

$$N = \frac{\pi D A'}{I_a} = \frac{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^4}{19{,}8} = 495.$$

20. Крайние пределы чисел пазов якоря по (3.9), значения t_{Z1} по табл.3.7:

$$Z_{min} = \frac{\pi D}{t_{Z1max}} = \frac{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3}} = 25;$$

$$Z_{max} = \frac{\pi D}{t_{Z1min}} = \frac{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} = 49.$$

Принимаем $Z = 29$; $t_{Z1} = \frac{\pi D}{Z} = \frac{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3}}{29} = 16{,}9 \cdot 10^{-3}$м.

21. Число эффективных проводников в пазу:

$$N_п = \frac{N}{Z} = \frac{495}{29} = 17{,}1.$$

принимаем $N_п = 18$, тогда $N = N_п Z = 18 \cdot 29 = 522$.

22. Выбираем паз полузакрытой овальной формы с параллельными сторонами зубца.

23. Число коллекторных пластин K для различных значений $u_п = \frac{K}{Z}$ выбираем, сравнивая три варианта:

Таблица 1. Выбор числа коллекторных пластин

№ п/п	$u_п$	$K = u_п Z$	$w_c = \frac{N}{2K}$	$U_{к.ср} = \frac{2pU_н}{K}$, В
1	1	29	9	30,3
2	2	58	4,5	15,2
3	3	87	3	10,1

Поскольку $U_{к.ср}$ не должно превышать 15÷16 В принимаем вариант 3, обеспечивающий обмотку с целым числом витков в секции $w_c = 3$. Тогда число коллекторных пластин $K = 87$, число эффективных проводников в пазу $N_п = 18$, число витков в обмотке якоря $w_a = \frac{N}{2w_c} = \frac{522}{2 \cdot 3} = 87$.

24. Уточняем линейную нагрузку:

$A = \frac{NI_a}{\pi D} = \frac{522 \cdot 19{,}8}{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3}} = 2{,}1 \cdot 10^4$ А/м.

25. Корректируем длину якоря:

$l_\delta = l_\delta{}' \frac{A'}{A} = 165 \cdot 10^{-3} \frac{2 \cdot 10^4}{2{,}1 \cdot 10^4} = 157 \cdot 10^{-3}$м.

26. Наружный диаметр коллектора при полузакрытых пазах по (3.11):

$D_к \approx (0{,}65 \div 0{,}8) D = (0{,}65 \div 0{,}8) \cdot 156 \cdot 10^{-3} = (102 \div 125) \cdot 10^{-3}$м.

По таблице предпочтительного ряда чисел (см. § 3) для диаметра коллектора принимаем $D_к = 112 \cdot 10^{-3}$м.

27. Окружная скорость коллектора:

$v_к = \frac{\pi D_к n_н}{60} = \frac{\pi \cdot 112 \cdot 10^{-3} \cdot 1500}{60} = 8{,}8$ м/с.

28. Коллекторное деление:

$t_к = \frac{\pi D_к}{K} = \frac{\pi \cdot 112 \cdot 10^{-3}}{87} = 4 \cdot 10^{-3}$м.

29. Полный ток паза:

$I_п = I_a N_п = 19{,}8 \cdot 18 = 356$ А.

30. Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря:

$J_a = \frac{AJ_a}{A} = \frac{1{,}6 \cdot 10^{11}}{2{,}1 \cdot 10^4} = 7{,}6 \cdot 10^6$ А/м^2,

где $AJ_a = 1{,}6 \cdot 10^{11}$ А^2/м^3 принимаем предварительно по рис.3.15.

31. Предварительное сечение эффективного провода по (3.13)

$$q_a = \frac{I_a}{J_a} = \frac{19{,}8}{7{,}6 \cdot 10^6} = 2{,}6 \cdot 10^{-6}\text{м}^2.$$

Принимаем два параллельных проводника марки ПЭТВ: по ГОСТ (приложение 2, П.2.1) диаметр голого провода $1{,}32 \cdot 10^{-3}$м; диаметр изолированного провода $1{,}405 \cdot 10^{-3}$м; сечение эффективного проводника $2 \cdot 1{,}368 \cdot 10^{-6}$=$2{,}736 \cdot 10^{-6}$м^2.

Расчет геометрии зубцовой зоны

32. Сечение полузакрытого паза (за вычетом сечения пазовой изоляции и пазового клина) при предварительно принятом коэффициенте заполнения $k_з = 0{,}72$ по (3.25):

$$S_0 = \frac{N_п 2 d_{из}^2}{k_з} = \frac{18 \cdot 2 \left(1{,}405 \cdot 10^{-3}\right)^2}{0{,}72} = 98{,}7 \cdot 10^{-6}\text{м}^2$$

33. Высота паза (предварительно по рис. 3.17): $h_п = 26 \cdot 10^{-3}$ м.

Высота шлица паза $h_ш = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$м; ширина шлица (с учетом диаметра изолированного проводника и двусторонней толщины пазовой изоляции по табл.3.2) $b_ш = 3 \cdot 10^{-3}$м.

34. Ширина зуба по (3.15):

$$b_Z = \frac{B_\delta t_{Z1}}{k_c B_Z} = \frac{0{,}65 \cdot 16{,}9 \cdot 10^{-3}}{0{,}93 \cdot 1{,}72} = 6{,}9 \cdot 10^{-3}\text{м},$$

где $B_Z = 1{,}72$ Тл – допустимое значение индукции в стали зубца (по табл. 3.11);

$k_c = 0{,}93$ – коэффициент заполнения пакета якоря сталью (по табл. 3.10).

35. Больший радиус по (3.18):

$$r_1 = \frac{\pi(D - 2h_ш) - Zb_Z}{2(Z + \pi)} = \frac{\pi\left(156 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}\right) - 29 \cdot 6{,}9 \cdot 10^{-3}}{2(29 + \pi)} = 4{,}5 \cdot 10^{-3}\text{м}.$$

36. Меньший радиус по (3.19):

$$r_2 = \frac{\pi(D - 2h_п) - Zb_Z}{2(Z - \pi)} = \frac{\pi\left(156 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 26 \cdot 10^{-3}\right) - 29 \cdot 6{,}9 \cdot 10^{-3}}{2(29 - \pi)} = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

37. Расстояние между центрами радиусов по (3.20):

$h_1 = h_п - h_ш - r_1 - r_2 = 26 \cdot 10^{-3} - 0{,}8 \cdot 10^{-3} - 4{,}5 \cdot 10^{-3} - -2{,}5 \cdot 10^{-3} = 18{,}2 \cdot 10^{-3}$ м

38. Минимальное сечение зубцов якоря по табл. 5.1:

$$S_Z = \frac{Z \alpha_\delta b_Z l_\delta k_c}{2p} = \frac{29 \cdot 0{,}64 \cdot 6{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}93}{4} = 46{,}7 \cdot 10^{-4}\text{ м}^2.$$

39. Предварительное значение ЭДС:

$E_н = U_н k_д = 220 \cdot 0{,}95 = 209$ В,

где $k_д = 0{,}95$ – по табл. 2.1.

40. Предварительное значение магнитного потока на полюс:

$\Phi_{\delta н}{}' = \frac{60E_н}{pNn_н} = \frac{60 \cdot 209}{2 \cdot 522 \cdot 1500} = 0{,}8 \cdot 10^{-2}$Вб.

41. Для магнитопровода якоря принимаем сталь марки 2312. Индукция в сечении зубцов:

$B_Z = \frac{\Phi_{\delta н}{}'}{S_Z} = \frac{0{,}8 \cdot 10^{-2}}{46{,}7 \cdot 10^{-4}} = 1{,}71$ Тл.

Расчет обмотки якоря

42. Длина лобовой части витка по (3.28):

$l_л = (1{,}2 \div 1{,}35)\tau = (1{,}2 \div 1{,}3) \cdot 122 \cdot 10^{-3} = 158 \cdot 10^{-3}$м

43. Средняя длина витка обмотки якоря с учетом (3.26):

$l_{a.ср} = 2(l_л + l_п) = 2(158 \cdot 10^{-3} + 157 \cdot 10^{-3}) = 630 \cdot 10^{-3}$м

44. Полная длина проводников обмотки якоря:

$L_{Ma} = w_a l_{aср} = 87 \cdot 630 \cdot 10^{-3} = 54{,}8$м

45. Сопротивление обмотки якоря при $\vartheta = 20°$С по (3.29):

$R_a = \rho_\vartheta \frac{L_{Ma}}{(2a)^2 q_a} = \frac{54{,}8}{57 \cdot 10^6 \cdot 2^2 \cdot 2{,}736 \cdot 10^{-6}} = 0{,}09$ Ом

где ρ_ϑ по табл. 3.14.

46. Сопротивление обмотки якоря при $\vartheta = 75°$С (см. табл. 3.14):

$R_{aн} = 1{,}21R_a = 1{,}21 \cdot 0{,}09 = 0{,}11$ Ом

47. Масса меди обмотки якоря по (3.30):

$m_{Ma} = 8900 L_{Ma} q_a = 8900 \cdot 54{,}8 \cdot 2{,}736 \cdot 10^{-6} = 1{,}334$ кг

48. Расчет шагов обмотки:

а) шаг по коллектору и результирующий шаг

$y_к = y = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{87-1}{2} = 43;$

б) первый частичный шаг $y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon = \frac{87}{4} - \frac{3}{4} = 21;$

в) второй частичный шаг $y_2 = y - y_1 = 43 - 21 = 22.$

Определение размеров магнитной цепи

49. Предварительное значение внутреннего диаметра якоря и диаметра вала:

$D_0 = 27 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_н}{n_н}} = 27 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{\frac{7{,}5 \cdot 10^3}{1500}} = 46 \cdot 10^{-3}$м

50. Высота спинки якоря:

$$h_j = \frac{D - D_0}{2} - h_{\text{п}} = \frac{156 \cdot 10^{-3} - 46 \cdot 10^{-3}}{2} - 26 \cdot 10^{-3} = 29 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

51. Принимаем для сердечников главных полюсов сталь марки 3411 толщиной 0,5 мм, коэффициент рассеяния $\sigma_{\text{г}} = 1{,}15$, длина сердечника $l_{\text{г}} = l_\delta = 157 \cdot 10^{-3}$м, коэффициент заполнения сталью по табл. 3.10 $k_c = 0{,}97$, ширину выступа полюсного наконечника $b_{\text{г.в}} \approx 0{,}1 b_{\text{р}} = 8 \cdot 10^{-3}$м.

52. Ширина сердечника главного полюса:

$$b_{\text{г}} = b_{\text{р}} - 2b_{\text{г.в}} = 78 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 62 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

53. Индукция в сердечнике главного полюса из (5.58):

$$B_{\text{г}} = \frac{\sigma_{\text{г}} \Phi_{\delta\text{н}}}{k_c l_{\text{г}} b_{\text{г}}} = \frac{1{,}15 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 62 \cdot 10^{-3}} = 1 \text{ Тл}$$

$k_c = 0{,}95$ – коэффициент заполнения пакета сталью (по табл. 3.10).

54. Сечение станины (см.§5):

$$S_{\text{с}} = \frac{\sigma_{\text{г}} \Phi_{\delta\text{н}}}{2B_{\text{с}}} = \frac{1{,}15 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1{,}3} = 35{,}4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

55. Длина станины по (5.6):

$$l_c = l_{\text{г}} + 0{,}4D = 157 \cdot 10^{-3} + 0{,}4 \cdot 156 \cdot 10^{-3} = 220 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

56. Высота станины (см.табл.5.1):

$$h_{\text{с}} = \frac{S_{\text{с}}}{l_{\text{с}}} = \frac{35{,}4 \cdot 10^{-4}}{220 \cdot 10^{-3}} = 16 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

57. Наружный диаметр станины:

$$D_{\text{н}} = 2h - (8 \div 10) \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 160 \cdot 10^{-3} - (8 \div 10) \cdot 10^{-3} = 310 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

58. Внутренний диаметр станины:

$$d_{\text{с}} = D_{\text{н}} - 2h_{\text{с}} = 310 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 278 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

59. Воздушный зазор согласно рис. 4.2 принимаем $\delta = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$м.

60. Высота главного полюса:

$$h_{\text{г}} = \frac{d_{\text{с}} - D}{2} - 3\delta = \frac{278 \cdot 10^{-3} - 156 \cdot 10^{-3}}{2} - 3 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 56{,}5 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

Расчетные сечения магнитной цепи

61. Сечение воздушного зазора (см.табл.5.1):

$$S_\delta = b_{\text{р}} l_\delta = 78 \cdot 10^{-3} \cdot 157 \cdot 10^{-3} = 122{,}5 \cdot 10^{-4}\text{м}^2$$

62. Длина стали якоря:

$l_{\text{ст}} = l_\delta k_c = 157 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}93 = 146 \cdot 10^{-3}$м

63. Минимальное сечение зубцов якоря (п.38) $S_Z = 46{,}7 \cdot 10^{-4}$ м^2.

64. Сечение спинки якоря (см.табл.5.1):

$S_j = l_{\text{ст}} h_j = 146 \cdot 10^{-3} \cdot 29 \cdot 10^{-3} = 42{,}3 \cdot 10^{-4}$м^2

65. Сечение сердечника главного полюса (см.табл.5.1):

$S_{\text{г}} = k_c l_{\text{г}} b_{\text{г}} = 0{,}95 \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 62 \cdot 10^{-3} = 92{,}5 \cdot 10^{-4}$м^2

66. Сечение станины (п.54) $S_{\text{с}} = 35{,}4 \cdot 10^{-4}$ м^2

Средние длины магнитных линий

67. Воздушный зазор (п.59) $\delta = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$м.

68. Коэффициент воздушного зазора, учитывающий наличие пазов на якоре, по (5.2.б):

$$k_{\delta a} = \frac{t_{Z1} + 10\delta}{t_{Z1} - b_{\text{ш}} + 10\delta} = \frac{16{,}9 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3}}{16{,}9 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3}} = 1{,}1$$

69. Расчетная длина воздушного зазора:

$L_\delta = k_{\delta a} \delta = 1{,}1 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 1{,}65 \cdot 10^{-3}$м

70. Зубцы якоря (табл.5.1):

$L_Z = h_{\text{п}} - 0{,}2 r_1 = 26 \cdot 10^{-3} - 0{,}2 \cdot 4{,}5 \cdot 10^{-3} = 25{,}1 \cdot 10^{-3}$м

71. Спинка якоря (табл.5.1):

$$L_j = \frac{\pi(D_0 + h_j)}{4p} + \frac{h_j}{2} = \frac{\pi(46 \cdot 10^{-3} + 29 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 4} + \frac{29 \cdot 10^{-3}}{2} =$$
$$= 44 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

72. Сердечник главного полюса:

$L_{\text{г}} = h_{\text{г}} = 56{,}5 \cdot 10^{-3}$м

73. Воздушный зазор между главным полюсом и станиной:

$L_{\text{с.п}} = 2l_{\text{г}} \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} =$
$= 0{,}13 \cdot 10^{-3}$м

74. Станина (табл.5.1):

$$L_{\text{с}} = \frac{\pi(D_{\text{н}} - h_{\text{с}})}{4p} + \frac{h_{\text{с}}}{2} = \frac{\pi(310 \cdot 10^{-3} - 16 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 4} + \frac{16 \cdot 10^{-3}}{2} = 123{,}5 \cdot 10^{-3}\text{м}$$

Индукция в расчетных сечениях магнитной цепи

75. Индукция в воздушном зазоре (табл.5.1):

$$B_{\delta\text{н}} = \frac{\Phi_{\delta\text{н}}}{S_\delta} = \frac{0{,}8 \cdot 10^{-2}}{122{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}653 \text{ Тл}$$

76. Индукция в сечении зубцов якоря (табл.5.1):

$$B_Z = \frac{\Phi_{\delta н}}{S_Z} = \frac{0{,}8 \cdot 10^{-2}}{46{,}7 \cdot 10^{-4}} = 1{,}71 \text{ Тл}$$

77. Индукция в спинке якоря (табл.5.1):

$$B_j = \frac{\Phi_{\delta н}}{2S_j} = \frac{0{,}8 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 42{,}4 \cdot 10^{-4}} = 0{,}94 \text{ Тл}$$

78. Индукция в сердечнике главного полюса (табл.5.1):

$$B_г = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{S_г} = \frac{1{,}15 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-2}}{92{,}5 \cdot 10^{-4}} = 1 \text{ Тл}$$

Для стали 3411 допустимое значение $B_г \leq 1{,}5$ Тл.

79. Индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной $B_{с.п} = B_г = 1$ Тл.

80. Индукция в станине (табл.5.1):

$$B_с = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{2S_с} = \frac{1{,}15 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 35{,}4 \cdot 10^{-4}} = 1{,}3 \text{ Тл}$$

Магнитные напряжения отдельных участков магнитной цепи (по табл.5.1)

81. Магнитное напряжение воздушного зазора:

$F_\delta = 0{,}8 B_\delta L_\delta \cdot 10^6 = 0{,}8 \cdot 0{,}653 \cdot 1{,}65 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 862$ А

82. Коэффициент вытеснения потока:

$$k_Z = \frac{t_{Z1} l_\delta}{b_Z l_{ст}} = \frac{16{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 157 \cdot 10^{-3}}{6{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 146 \cdot 10^{-3}} = 2{,}63$$

83. Магнитное напряжение зубцов якоря:

$F_Z = H_Z L_Z = 8200 \cdot 25{,}1 \cdot 10^{-3} = 206$ А

H_Z определяется по табл. П.3.6. (приложение 3) для стали 2312: $H_Z = 8200$ А/м.

84. Магнитное напряжение ярма якоря:

$F_j = H_j L_j = 210 \cdot 44 \cdot 10^{-3} = 9{,}2$ А

H_j определяется по табл. П.3.6. (приложение 3) для стали 2312: $H_j = 210$ А/м.

85. Магнитное напряжение сердечника главного полюса:

$F_г = H_г L_г = 170 \cdot 56{,}5 \cdot 10^{-3} = 9{,}6$ А

$H_г$ определяется по табл. П.3.10. (приложение 3) для стали 3411: $H_г = 170$ А/м.

86. Магнитное напряжение воздушного зазора между главным полюсом и станиной:

$F_{\text{с.п}} = 0{,}8 B_{\text{г}} L_{\text{с.п}} \cdot 10^6 = 0{,}8 \cdot 1 \cdot 0{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 104$ А

87. Магнитное напряжение станины:

$F_{\text{с}} = H_{\text{с}} L_{\text{с}} = 1590 \cdot 123{,}5 \cdot 10^{-3} = 196$ А

$H_{\text{с}}$ определяется по табл. П.3.9. (приложение 3) для массивной стали Ст3: $H_{\text{с}} = 1590$ А/м.

88. Суммарная МДС на полюс:

$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_Z + F_j + F_{\text{г}} + F_{\text{с.п}} + F_{\text{с}} = 862 + 206 + 9{,}2 + 9{,}6 + 104 + +196 = 1387$ А

89. МДС переходного слоя:

$F_{\delta \text{Zj}} = F_{\delta} + F_Z + F_j = 862 + 206 + 9{,}2 = 1077$ А

Аналогичным образом производим расчет для потоков, равных 0,5; 0,75; 1,1; 1,15 номинального значения. Результаты расчета сведены в таблице 2. По полученным данным строим характеристику намагничивания $B_{\delta} = f(F_{\Sigma})$ и переходную характеристику $B_{\delta} = f(F_{\delta \text{Zj}})$ (рис.1).

Таблица 2. **Расчет характеристики намагничивания машины**

№п/п	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	0,5× $\Phi_{\delta \text{н}}$	0,75× $\Phi_{\delta \text{н}}$	0,9× $\Phi_{\delta \text{н}}$	$\Phi_{\delta \text{н}}$	1,1× $\Phi_{\delta \text{н}}$	1,15× $\Phi_{\delta \text{н}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Магнитный поток	Φ_{δ}	Вб	0,4 × $\times 10^{-2}$	0,6 × $\times 10^{-2}$	0,72 × $\times 10^{-2}$	0,8 × $\times 10^{-2}$	0,88 × $\times 10^{-2}$	0,92 × $\times 10^{-2}$
2	ЭДС	$E = \frac{pN}{60a} \Phi_{\delta} n_{\text{н}}$	В	104,4	156,6	188	209	229,7	240
3	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{\alpha_{\delta} \tau l_{\delta}}$	Тл	0,327	0,49	0,588	0,653	0,718	0,751
4	МДС воздушного зазора	$F_{\delta} = 0{,}8 B_{\delta} L_{\delta} \cdot 10^6$	А	432	647	776	862	948	991
5	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_Z = \frac{\Phi_{\delta \text{н}}}{S_Z}$	Тл	0,857	1,285	1,542	1,71	1,884	1,97
6	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря	H_Z (по приложению3)	А/м	170	520	2200	8200	18200	32200
7	Магнитное напряжение	$F_Z = L_Z H_{Z\text{ср}}$	А	4,3	13	55,2	206	457	808
8	Магнитная индукция в спинке якоря	$B_j = \frac{\Phi_{\delta}}{2 S_j}$	Тл	0,473	0,71	0,85	0,94	1,04	1,09
9	Напряженность магнитного поля в спинке якоря	H_j (по приложению 3)	А/м	74	99	165	210	164	294
10	Магнитное напряжение спинки якоря	$F_j = L_j H_j$	А	3,3	4,4	7,3	9,2	72,2	13
11	Магнитный поток главного полюса	$\Phi_{\text{г}} = \sigma_{\text{г}} \Phi_{\delta}$	Вб	0,46 × $\times 10^{-2}$	0,69 × $\times 10^{-2}$	0,83 × $\times 10^{-2}$	0,92 × $\times 10^{-2}$	1,01 × $\times 10^{-2}$	1,06 × $\times 10^{-2}$

продолжение табл.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	$B_{\text{г}} = \frac{\Phi_{\text{г}}}{S_{\text{г}}}$	Тл	0,497	0,746	0,897	1	1,09	1,146
13	Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса	$H_{\text{г}}$ (по приложению 3)	А/м	85	125	150	170	210	240
14	Магнитное напряжение сердечника главного полюса	$F_{\text{г}} = L_{\text{г}} H_{\text{г}}$	А	4,8	7,1	8,5	9,6	11,9	13,6
15	Магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной	$B_{\text{с.п}} = B_{\text{г}}$	Тл	0,497	0,746	0,897	1	1,09	1,146
16	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и главным полюсом	$F_{\text{с.п}} = 0{,}8 L_{\text{с.п}} B_{\text{г}} \cdot 10^6$	А	52	78	93	104	113	119
17	Магнитная индукция в станине	$B_c = \frac{\sigma_{\text{г}} \Phi_\delta}{2 S_c}$	Тл	0,648	0,972	1,17	1,3	1,43	1,49
18	Напряженность магнитного поля в станине	H_c (по приложению 3)	А/м	535	885	1227	1590	2300	2800
19	Магнитное напряжение станины	$F_c = L_c H_c$	А	66	109	151,5	196	284	346
20	Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи	$F_\Sigma = F_\delta + F_Z + F_j + F_{\text{г}} + {+F_{\text{с.п}}} + F_c$	А	562	859	1092	1387	1886	2291
21	Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя	$F_{\delta Zj} = F_\delta + F_Z + F_j$	А	440	664	839	1077	1477	1812

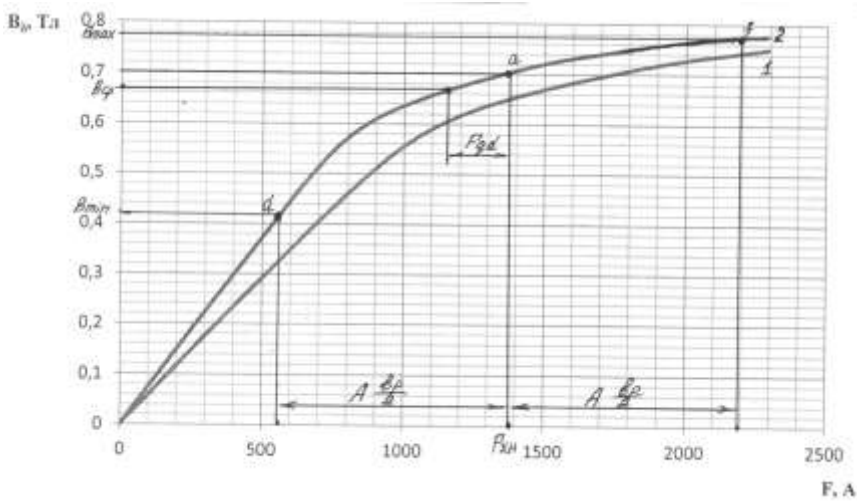


Рис.1. Характеристика холостого хода (1) и переходная характеристика (2)

Расчет параллельной обмотки возбуждения

90. Размагничивающее действие реакции якоря определяем по переходной характеристике (рис.1): $F_{qd} = 67\ A$.

91. Необходимая МДС параллельной обмотки по (6.1):

$F_{\text{в}} = F_{\Sigma} + F_{qd} = 1387 + 67 = 1454\ A$

92. Принимаем ширину катушки параллельной обмотки $b_{\text{кт.г}} = 25 \cdot 10^{-3}$м (§ 6), тогда средняя длина витка обмотки по (6.2):

$l_{\text{в.ср}} = 2(l_{\text{г}} + b_{\text{г}}) + \pi(b_{\text{кт.г}} + 2 \cdot \Delta_{\text{из}}) = 2(157 \cdot 10^{-3} + 62 \cdot 10^{-3}) +$

$+\pi(25 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-3}) = 520 \cdot 10^{-3}$м

93. Сечение меди параллельной обмотки по (6.3):

$q_{\text{в}} = \frac{\rho_{\vartheta} k_{\text{з}} 2p F_{\text{в}} l_{\text{в.ср}}}{U_{\text{в}}} = \frac{1{,}1 \cdot 4 \cdot 1454 \cdot 520 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 10^{6} \cdot 220} = 0{,}265 \cdot 10^{-6}\text{м}^2$

где $k_{\text{з}}$ – коэффициент запаса (§ 6), $k_{\text{з}} = 1{,}1$; ρ_{ϑ} – удельное электрическое сопротивление меди (по табл.3.14), $\rho_{\vartheta} = \frac{1}{57} \cdot 10^{-6}$ Ом · м.

Принимаем по табл. 6.1 круглый провод ПЭТВ: по табл. П.2.1 диаметр голого провода $0{,}6 \cdot 10^{-3}$м, диаметр изолированного провода $0{,}655 \cdot 10^{-3}$м, сечение провода $0{,}283 \cdot 10^{-6}\text{м}^2$.

94. Номинальную плотность тока принимаем (для машин исполнения IP22 по §6) $J_{\text{в}} = 5{,}5 \cdot 10^6$ А/м^2.

95. Число витков на полюс по (6.4):

$$w_{\text{в}} = \frac{F_{\text{в}}}{J_{\text{в}} q_{\text{в}}} = \frac{1454}{5{,}5 \cdot 10^6 \cdot 0{,}283 \cdot 10^{-6}} = 934$$

96. Номинальный ток возбуждения:

$$I_{\text{в,н}} = \frac{F_{\text{в}}}{w_{\text{в}}} = \frac{1454}{934} = 1{,}56 \text{ А}$$

97. Плотность тока в обмотке $J_{\text{в,н}} = \frac{I_{\text{в,н}}}{q_{\text{в}}} = 5{,}5 \cdot 10^6$ А/м^2.

98. Сопротивление обмотки возбуждения при $\vartheta = 20°$C по (6.6):

$$R_{\text{в}} = \frac{\rho_\vartheta 2 p w_{\text{в}} l_{\text{в.ср}}}{q_{\text{в}}} = \frac{4 \cdot 934 \cdot 520 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 10^6 \cdot 0{,}283 \cdot 10^{-6}} = 120 \text{ Ом}.$$

99. Сопротивление обмотки возбуждения при $\vartheta = 75°$C:

$$R_{\text{вн}} = 1{,}22 R_{\text{в}} = 1{,}22 \cdot 120 = 146{,}4 \text{ Ом}.$$

100. Масса меди параллельной обмотки по (6.7):

$$m_{\text{Мв}} = 19{,}6 p l_{\text{в.ср}} w_{\text{в}} q_{\text{в}} \cdot 10^3 = 19{,}6 \cdot 2 \cdot 520 \cdot 10^{-3} \cdot 934 \cdot 0{,}283 \cdot 10^{-6} \cdot \cdot 10^3 = 5{,}4 \text{ кг}$$

Конструкция изоляции и крепления обмоток главных полюсов приведена в табл.1.2.

Коллектор и щетки

101. Ширина нейтральной зоны (§7):

$$b_{\text{н.з}} = \tau - b_p = 122 \cdot 10^{-3} - 78 \cdot 10^{-3} = 44 \cdot 10^{-3} \text{м}$$

102. Принимаем ширину щетки равной $b_{\text{щ}} = (2 \div 4) t_{\text{к}} = (8 \div 16) \cdot 10^{-3}$ м (§7); по табл. П.4.1 выбираем стандартные размеры щетки: $b_{\text{щ}} \times l_{\text{щ}} = 8 \cdot 10^{-3} \text{м} \times 16 \cdot 10^{-3} \text{м}$. выбираем щетки марки ЭГ-14 (табл.П.4.2).

103. Поверхность соприкосновения щетки с коллектором

$$S_{\text{щ}} = b_{\text{щ}} l_{\text{щ}} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 1{,}28 \cdot 10^{-4} \text{м}^2$$

104. При допустимой плотности тока $J_{\text{щ}} = 11 \cdot 10^4$ А/м^2 (табл.П.4.2) число щеток на болт

$$N_{\text{щ}} = \frac{I_{\text{н}}}{p S_{\text{щ}} J_{\text{щ}}} = \frac{40{,}6}{2 \cdot 1{,}28 \cdot 10^{-4} \cdot 11 \cdot 10^4} = 1{,}44$$

Принимаем $N_{\text{щ}} = 2$.

105. Поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором:

$$\Sigma S_{\text{щ}} = 2 p N_{\text{щ}} S_{\text{щ}} = 4 \cdot 2 \cdot 1{,}28 \cdot 10^{-4} = 10{,}24 \cdot 10^{-4} \text{м}^2$$

106. Плотность тока под щетками:

$J_{щ} = \frac{2 \cdot I_{н}}{\Sigma S_{щ}} = \frac{2 \cdot 40,6}{10,24 \cdot 10^{-4}} = 7,93 \cdot 10^{4}$ А/м^2

107. Активная длина коллектора по (7.13):

$l_{к} = N_{щ}\left(l_{щ} + 8 \cdot 10^{-3}\right) + 10 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot (16 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-3}) +$
$+10 \cdot 10^{-3} = 58 \cdot 10^{-3}$м

Коммутационные параметры

108. Ширина зоны коммутации по (7.8):

$b_{з.к} = \left(\frac{b_{щ}}{t_{к}} + u_{п} - \frac{a}{p} + \varepsilon_{к}\right) t_{к} \frac{D}{D_{к}} = \left(\frac{8 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} + 3 - \frac{1}{2} + \frac{3}{4}\right) \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{156 \cdot 10^{-3}}{112 \cdot 10^{-3}} =$
$= 30,64 \cdot 10^{-3}$м

109. Отношение $\frac{b_{з.к}}{\tau - b_{р}} = \frac{30,64 \cdot 10^{-3}}{122 \cdot 10^{-3} - 78 \cdot 10^{-3}} = 0,696$, что удовлетворяет условию $\frac{b_{з.к}}{\tau - b_{р}} = (0,55 \div 0,7)$.

110. Коэффициент магнитной проводимости по (7.2):

$\lambda = 0,6\frac{h_{п}}{2r_{2}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} + \frac{l_{л}}{l_{a}} + \frac{2,5 \cdot 10^{5}}{w_{c} l_{a} A v_{a}} \cdot \frac{a}{p} = 0,6\frac{26 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} + \frac{158 \cdot 10^{-3}}{157 \cdot 10^{-3}} +$
$+ \frac{2,5 \cdot 10^{5}}{3 \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^{4} \cdot 12,25} \cdot \frac{1}{2} = 5,43$

где $v_{a} = \frac{\pi D n_{н}}{60} = \frac{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3} \cdot 1500}{60} = 12,25$ м/с – окружная скорость.

111. Реактивная ЭДС по (7.1):

$E_{р} = 2 w_{c} l_{a} A v_{a} \lambda \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 3 \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^{4} \cdot 12,25 \cdot 5,43 \cdot$
$\cdot 10^{-6} = 1,3$В

112. Воздушный зазор под добавочным полюсом принимаем $\delta_{д} = 0,02D \approx 0,02 \cdot 156 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3}$м

113. Расчетная длина воздушного зазора под добавочным полюсом с учетом (5,2б) и §8:

$L_{\delta д} = k_{\delta д} \delta_{д} = 1,07 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 3,21 \cdot 10^{-3}$м

где $k_{\delta д} = \frac{t_{Z1} + 10\delta}{t_{Z1} - b_{ш} + 10\delta} = \frac{16,9 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{16,9 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 1,07$

114. Средняя индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом по (8.1):

$B_{\delta д} = \frac{E_{p}'}{2 l_{\delta} v_{a}} = \frac{1,43}{2 \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 12,25} = 0,372$ Тл

где $E_{p}' = 1,1 E_{p} = 1,1 \cdot 1,3 = 1,43$ В принимаем для обеспечения некоторого ускорения коммутации.

115. Ширина наконечника добавочного полюса согласно (8.2) и на основании предварительных расчетов: $b_{д.н} \leq (0,55 \div 0,75) b_{з.к} \leq$

$\leq (0{,}55 \div 0{,}75) \cdot 30{,}64 \cdot 10^{-3} \leq (16{,}85 \div 22{,}98) \cdot 10^{-3}$м

Принимаем $b_{\text{д.н}} = 8 \cdot 10^{-3}$м.

116. Магнитный поток добавочного полюса (8.3):

$\Phi_{\delta\text{д}} = B_{\delta\text{д}} b_{\text{д.н}}{}' l_{\text{д.н}} = 0{,}372 \cdot 14 \cdot 10^{-3} \cdot 157 \cdot 10^{-3} = 0{,}818 \cdot 10^{-3}$Вб

где $l_{\text{д.н}} = l_a = 157 \cdot 10^{-3}$м – длина наконечника добавочного полюса;

$b_{\text{д.н}}{}' = b_{\text{д.н}} + 2 \cdot \delta_{\text{д}} = 8 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 14 \cdot 10^{-3}$м – расчетная ширина полюсного наконечника добавочного полюса.

117. Выбираем коэффициент рассеяния добавочного полюса $\sigma_{\text{д}} = 2{,}5$ (см.§8). Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса по (8.4):

$\Phi_{\text{д}} = \sigma_{\text{д}} \Phi_{\delta\text{д}} = 2{,}5 \cdot 0{,}818 \cdot 10^{-3} = 0{,}205 \cdot 10^{-2}$Вб

118. Расчетная индукция в сердечнике добавочного полюса по (8.5):

$B_{\text{сд}} = \frac{\Phi_{\text{д}}}{l_{\text{д}} b_{\text{д}}} = \frac{0{,}205 \cdot 10^{-2}}{157 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{-3}} = 1{,}45$Тл

где $b_{\text{д}} = 9 \cdot 10^{-3}$м – ширина сердечника добавочного полюса по рис.8.2.

Результаты расчета магнитной цепи добавочных полюсов сведены в табл.3.

Таблица 3. **Расчет МДС обмотки добавочных полюсов**

№ п/п	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
1	2	3	4	5
1	Магнитный поток в воздушном зазоре	$\Phi_{\delta\text{д}}$	Вб	$0{,}818 \cdot 10^{-3}$
2	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta\text{д}} = \frac{E_p{}'}{2 l_\delta v_a}$	Тл	0,372
3	Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_{\delta\text{д}} = 0{,}8 \delta_{\text{д}} k_{\delta\text{д}} B_{\delta\text{д}} \cdot 10^6$	А	955
4	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_Z = k_Z B_{\delta\text{д}}$	Тл	0,978
5	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря (по приложению 3)	H_Z	А/м	230
6	Магнитное напряжение зубцов	$F_Z = L_Z H_Z$	А	5,77

1	2	3	4	5
7	Магнитная индукция в спинке ярма: на участке согласного направления главного потока добавочных полюсов на участке встречного направления главного потока и потока добавочных полюсов	$B_{j1} = \frac{\Phi_\delta + \Phi_{\delta д}}{2S_j}$ $B_{j1} = \frac{\Phi_\delta - \Phi_{\delta д}}{2S_j}$	Тл Тл	1,04 0,85
8	Напряженность магнитного поля: на участке с индукцией B_{j1} на участке с индукцией B_{j2} средняя напряженность магнитного поля в ярме	H_{j1} H_{j2} $H_{j\text{ср}} = \frac{H_{j1} - H_{j2}}{2}$	А/м А/м А/м	264 165 49,5
9	Магнитное напряжение ярма якоря	$F_j = H_{j\text{ср}} L_j$	А	2,18
10	Магнитный поток добавочного полюса	$\Phi_д = \sigma_д \Phi_{\delta д}$	Вб	$0{,}205 \cdot 10^{-2}$
11	Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса	$B_{с.д} = \frac{\Phi_д}{b_д l_д}$	Тл	1,45
12	Напряженность магнитного поля в сердечнике добавочного полюса	$H_{с.д}$	А/м	1750
13	Магнитное напряжение в сердечнике добавочного полюса	$F_{с.д} = H_{с.д} h_д$	А	99
14	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и добавочным полюсом	$F_{\delta д2} = 0{,}8 B_{сд} \delta_{д2} \cdot 10^6$	А	232
15	Магнитная индукция в станине: на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов на участке встречного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{c1} = \frac{\Phi_г + \Phi_д}{2S_c}$ $B_{c2} = \frac{\Phi_г - \Phi_д}{2S_c}$	Тл Тл	1,59 1,01
16	Напряженность магнитного поля в станине: на участке с индукцией B_{c1} на участке с индукцией B_{c2}	H_{c1} H_{c2}	А/м А/м	3960 938
17	Средняя напряженность магнитного поля в станине	$H_{c.\text{ср}} = \frac{H_{c1} - H_{c2}}{2}$	А/м	1511
18	Магнитное напряжение участка станины	$F_c = H_{c.\text{ср}} L_c$	А	186,6
19	Сумма магнитных напряжений всех участков	$F_{д\Sigma} = F_{\delta д} + F_Z + F_j + F_{сд} + F_{\delta д2} + F_c$	А	1481
20	МДС обмотки добавочного полюса	$F_д = F_{д\Sigma} + \frac{A\tau}{2}$	А	2762

Примечание: принимаем $h_д = h_г = 56{,}5 \cdot 10^{-3}$м;

$$\delta_{д2} = 0{,}2 \cdot 10^{-3}\text{м}.$$

Расчет обмотки добавочных полюсов

119. МДС обмотки добавочного полюса (табл.3) $F_д = 2762$ А.

120. Число витков обмотки добавочного полюса на один полюс по (8.7):

$w_д = \frac{F_д a_д}{I} = \frac{2762 \cdot 1}{39{,}6} = 69{,}75$

где $a_д$ – число параллельных ветвей обмотки добавочного полюса; при токе $I \leq 1000$ А целесообразно принимать $a_д = 1$.

Принимаем $w_д = 70$.

121. Предварительное сечение провода обмотки добавочных полюсов по (8.8):

$q_д = \frac{I}{a_д J_д} = \frac{39{,}6}{1 \cdot 5 \cdot 10^6} = 7{,}92 \cdot 10^{-6}\text{м}^2$

Для многослойных обмоток выбираем согласно рекомендациям (§8) при исполнении по степени защиты IP22 $J_д = 5 \cdot 10^6\ \text{А/м}^2$.

122. Принимаем проводник обмотки добавочных полюсов из круглого провода марки ПСД (табл.6.1) и П.2.2 диаметром $3{,}15 \cdot 10^{-3}$м, диаметр изолированного провода $3{,}5 \cdot 10^{-3}$м, сечение провода $q_д = 7{,}8 \cdot 10^{-6}\text{м}^2$.

123. Уточняем плотность тока по выбранному сечению провода

$J_д = \frac{I}{a_д q_д} = \frac{39{,}6}{1 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-6}} = 5{,}08 \cdot 10^6\ \text{А/м}^2$

124. Ширина катушки $b_{кт.д} = 1{,}6 \cdot b_д = 1{,}6 \cdot 9 \cdot 10^{-3} = 14{,}4 \cdot 10^{-3}$м.

125. Средняя длина витка обмотки добавочного полюса по (8.9)

$l_{д.ср} = 2\left(b_д + l_д\right) + \pi\left(b_{кт.д} + 2\Delta_{из}\right) = 2 \cdot (9 \cdot 10^{-3} + 157 \cdot 10^{-3}) + \pi \cdot$

$\cdot (14{,}4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-3}) = 392 \cdot 10^{-3}$м

где $\Delta_{из} = 1{,}7 \cdot 10^{-3}$м – односторонний размер зазора между сердечником дополнительного полюса с учетом изоляции сердечника (по §8).

126. Полная длина проводника обмотки:

$L_д = 2p_д l_{д.ср} w_д = 4 \cdot 392 \cdot 10^{-3} \cdot 70 = 109{,}76$м

127. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре $\vartheta = 20°$С по (8.10) и п.126:

$R_д = \rho_\vartheta \frac{L_д}{q_д a_д^{\,2}} = \frac{109{,}76}{57 \cdot 10^6 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0{,}25$Ом.

128. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре $\vartheta = 75°C$:

$R_{дн} = 1{,}22R_{д} = 1{,}22 \cdot 0{,}25 = 0{,}3$ Ом.

129. Масса меди обмотки добавочных полюсов по (8.11):

$m_{д} = 8900 l_{д.ср} w_{д} 2 p_{д} q_{д} = 8900 \cdot 392 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 4 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-6} =$ 7,62кг

Потери и КПД

130. Электрические потери в обмотке якоря по (9.3):

$P_{э.а} = I^2 R_{ан} = 39{,}6^2 \cdot 0{,}11 = 172{,}5$ Вт.

131. Электрические потери в обмотке добавочных полюсов по (9.6):

$P_{э.д} = I^2 R_{дн} = 39{,}6^2 \cdot 0{,}3 = 470{,}5$ Вт.

132. Электрические потери в параллельной обмотке возбуждения по (9.5):

$P_{э.в} = \frac{U_в^2}{R_{вн}} = \frac{220^{\ 2}}{146{,}4} = 330{,}6$ Вт.

133. Электрические потери в переходном контакте щеток по (9.8):

$P_{щ} = 2\Delta U_{щ} I = 2 \cdot 2{,}5 \cdot 39{,}6 = 198$ Вт

где $\Delta U_{щ} = 2{,}5$ В по табл. П.4.2.

134. Потери на трение щеток о коллектор по (9.14):

$P_{тщ} = \Sigma S_{щ} p_{щ} f v_{к} = 10{,}24 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^{4} \cdot 0{,}25 \cdot 8{,}8 = 67{,}6$ Вт

где $p_{щ} = 3 \cdot 10^{4}$ Па – давление на щетку по табл. П.4.2. (для щетки марки ЭГ14);

$f = 0{,}25$ – коэффициент трения щетки (по приложению 4).

135. Потери на вентиляцию и в подшипниках по рис.9.1.:

$(P_{вент} + P_{т.п}) = 68$ Вт.

136. Масса стали ярма якоря по (9.12):

$m_j = 7800 \frac{\pi\left[(D-2h_п)^2 - D_0{}^2\right]}{4} l_\delta k_c =$

$7800 \cdot \frac{\pi \cdot \left[(156 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 26 \cdot 10^{-3})^2 - (46 \cdot 10^{-3})^2\right]}{4} \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}93 = 7{,}74$ кг

137. Условная масса стали зубцов якоря по (9.10):

$m_Z = 7800 Z b_Z \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}\right) l_\delta k_c = 7800 \cdot 29 \cdot 6{,}9 \cdot 10^{-3} \left(18{,}2 \cdot 10^{-3} + + \frac{4{,}5 \cdot 10^{-3} + 2{,}5 \cdot 10^{-3}}{2}\right) \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}93 = 4{,}95$ кг.

138. Магнитные потери в ярме якоря:

$P_j = m_j p_j = 7{,}74 \cdot 3{,}56 = 27{,}6$ Вт,

где $p_j = 2{,}3p_{1.0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B_j^2 = 2{,}3 \cdot 1{,}75 \cdot 1^2 \cdot 0{,}94^2 = 3{,}56$ Вт/кг

139. Магнитные потери в зубцах якоря:

$P_z = m_z p_z = 4{,}95 \cdot 11{,}77 = 58{,}3$ Вт,

где $p_z = 2{,}3p_{1.0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B_z^2 = 2{,}3 \cdot 1{,}75 \cdot 1^2 \cdot 1{,}71^2 = 11{,}77$ Вт/кг

140. Добавочные потери:

$P_{\text{доб}} = 0{,}01UI_{\text{н}} = 0{,}01 \cdot 220 \cdot 41{,}16 = 90{,}5$ Вт

где $I_{\text{н}} = 39{,}6 + 1{,}56 = 41{,}16$ А

141. Сумма потерь:

$\Sigma P = P_{\text{э.а}} + P_{\text{э.д}} + P_{\text{э.в}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{тщ}} + (P_{\text{вент}} + P_{\text{т.п}}) + P_j + P_z + P_{\text{доб}} =$

$= 172{,}5 + 470{,}5 + 330{,}6 + 198 + 67{,}6 + 68 + 27{,}6 + 58{,}3 + 90{,}5 =$

$= 1484$ Вт

142. Потребляемая мощность:

$P_1 = P_{\text{н}} + \Sigma P = 7500 + 1484 = 8984$ Вт

Ток $I_{1\text{н}} = \frac{P_1}{U_{\text{н}}} = \frac{8984}{220} = 40{,}84$ А

$I_{\text{н}} = 40{,}84 - 1{,}56 = 39{,}28$ А

143. Коэффициент полезного действия по (9.1):

$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + \Sigma P} = \frac{7500}{7500 + 1484} = 0{,}835.$

Рабочие характеристики

144. Для построения рабочих характеристик двигателя $n, M, I, P_1, \eta = f(P_2)$ при $U = 220$ В и токе возбуждения $I_{\text{в}} = I_{\text{в.н}} = 1{,}56$ А принимаем, что потери холостого хода с нагрузкой практически не меняются и составляют:

$P_0 = P_{\text{тщ}} + (P_{\text{вент}} + P_{\text{т.п}}) + P_j + P_z = 67{,}6 + 68 + 27{,}6 + 58{,}3 = 221{,}5$ Вт.

145. Постоянные потери двигателя:

$P_{\text{пост}} = P_0 + P_{\text{эв}} = 221{,}5 + 330{,}6 = 552{,}1$ Вт.

146. При номинальном токе якоря $I_{\text{н}} = 39{,}28$ А ЭДС обмотки якоря:

$E_{\text{н}} = U - I_a \Sigma R - 2\Delta U_{\text{щ}} = 220 - 39{,}28 \cdot 0{,}34 - 2 \cdot 2{,}5 = 202$ В

где $\Sigma R = R_a + R_{\text{д}} = 0{,}09 + 0{,}25 = 0{,}34$ Ом.

147. Номинальный магнитный поток в воздушном зазоре:

$\Phi_{\delta\text{н}} = \frac{60E_{\text{н}}}{pNn_{\text{н}}} = \frac{60 \cdot 202}{2 \cdot 522 \cdot 1500} = 0{,}77 \cdot 10^{-2}$ Вб.

148. Вращающий момент:

$$M = 9{,}57\frac{P_2}{n} = 9{,}57 \cdot \frac{7903}{1500} = 50{,}4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Результаты расчетов рабочих характеристик двигателя сведены в табл. 4, рабочие характеристики приведены на рис. 2.

Таблица 4. **Рабочие характеристики двигателя**

β	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,2
$I_{\text{в}}$, А	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
$I_{\text{а}} = I_{\text{ан}} \cdot \beta$, А	3,93	9,82	19,64	29,46	39,28	47,14
$I = I_{\text{а}} + I_{\text{в}}$, А	5,49	11,38	21,20	31,02	40,84	48,70
$P_1 = I \cdot U$, Вт	1207	2504	4664	6824	8985	10713
$P_{\text{пост}}$, Вт	552	552	552	552	552	552
$P_{\text{э а}} = I_{\text{а}}^2 \cdot \Sigma r$, Вт	5	33	131	295	525	755
$P_{\text{доб}} = 0{,}01 \cdot P_1$, Вт	12	25	47	68	90	107
$P_{\text{щ}} = I_{\text{а}} \cdot \Delta U_{\text{щ}}$, Вт	10	25	49	74	98	118
$P_{\text{пер}} = P_{\text{э а}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{доб}}$, Вт	27	82	227	437	713	980
$\Sigma P = P_{\text{пер}} + P_{\text{пост}}$, Вт	579	634	779	989	1265	1532
$P_2 = P_1 - \Sigma P$, Вт	628	1869	3885	5835	7720	9181
$\eta = (P_2/P_1) \cdot 100$, %	52,03	74,66	83,30	85,51	85,92	85,70
$E_{\text{а}} = U - I_{\text{а}} \cdot \Sigma r$, В	219	217	213	210	207	204
$n = \frac{60 \cdot E_a}{pN\Phi_{\text{н}}}$, об/мин	1632	1617	1592	1567	1542	1522
$M = 9{,}57\, P_2/n$, Н ∗ м	3,68	11,06	23,36	35,64	47,91	57,72

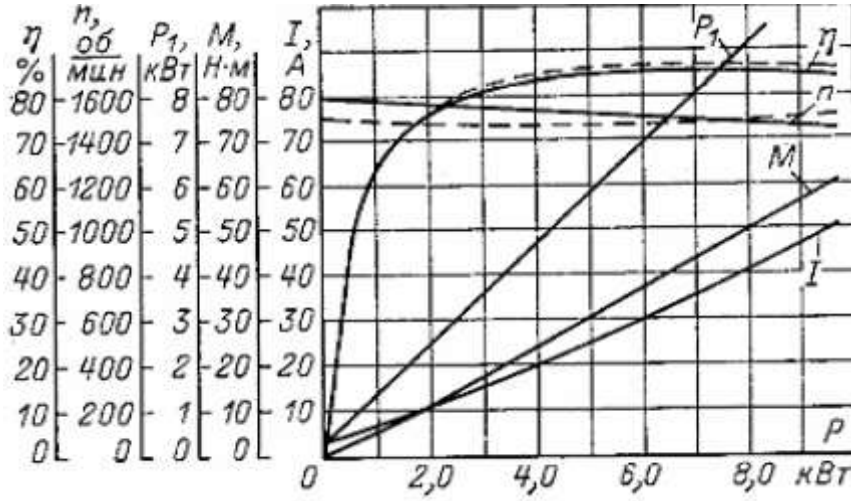


Рис.2. Рабочие характеристики двигателя

Тепловой расчет

Тепловой расчет выполняется для оценки тепловой напряженности машины и приближенного определения превышения температуры отдельных частей машины.

Для приближенной оценки тепловой напряженности машины необходимо сопротивление обмоток привести к температуре, соответствующей заданному классу изоляции; при классе нагревостойкости В сопротивления умножаются на коэффициент $k_т = 1{,}15$ (§10).

149. Потери мощности в обмотках с учетом поправочного коэффициента (по 10.13 – 10.17):

$P_{aт} = k_т I_н^2 R_{aн} = 1{,}15 \cdot 39{,}28^2 \cdot 0{,}11 = 195$ Вт

$P_{дт} = k_т I_н^2 R_{дн} = 1{,}15 \cdot 39{,}28^2 \cdot 0{,}3 = 532$ Вт

$P_{вт} = k_т I_{вн}^2 R_{вн} = 1{,}15 \cdot 1{,}56^2 \cdot 146{,}4 = 410$ Вт

150. Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности якоря (по рис.10.4) $\alpha_a = 84$ Вт/(м$^2 \cdot$ °С).

151. Превышение температуры охлаждаемой поверхности якоря:

$$\Delta\vartheta_a = \frac{P_{aт}\left(\frac{2l_\delta}{l_{aср}}\right)+P_{ст}}{\pi D l_a \alpha_a} = \frac{195\cdot\left(\frac{2\cdot157\cdot10^{-3}}{630\cdot10^{-3}}\right)+85{,}9}{\pi\cdot156\cdot10^{-3}\cdot157\cdot10^{-3}\cdot84} = 28°\text{C}$$

где $P_{ст} = P_j + P_z = 27{,}6 + 58{,}3 = 85{,}9$ Вт – потери в стали.

152. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки якоря по (10.36):

$$\Delta\vartheta_{\text{из.п}} = \frac{P_{a\text{т}}\left(\frac{2l_a}{l_{a\text{ср}}}\right)}{S_{\text{п}}} \cdot \left(\frac{r_1+r_2}{8\lambda'_{\text{экв}}} + \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экв}}}\right) = \frac{195\left(\frac{2\cdot157\cdot10^{-3}}{630\cdot10^{-3}}\right)}{24{,}73\cdot10^{-2}} \cdot \left(\frac{4{,}5\cdot10^{-3}+2{,}5\cdot10^{-3}}{8\cdot1{,}4} + \right.$$

$$\left. + \frac{0{,}5\cdot10^{-3}}{0{,}16}\right) = 1{,}5°\text{C}$$

где $S_{\text{п}} = \Pi Z l_\delta k_{\text{с}} = 58{,}4\cdot10^{-3}\cdot29\cdot157\cdot10^{-3}\cdot0{,}93 = 24{,}73\cdot 10^{-2}\text{м}^2$

$\Pi = \pi(r_1+r_2)+2h_1 = \pi(4{,}5\cdot10^{-3}+2{,}5\cdot10^{-3})+2\cdot18{,}2\cdot10^{-3} = 58{,}4\cdot10^{-3}\text{м}$

$\lambda'_{\text{экв}} = 1{,}4\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot°\text{C})$; $\lambda_{\text{экв}} = 0{,}16\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot°\text{C})$ (см.§10).

153. Превышение температуры охлаждаемой поверхности лобовых частей обмотки якоря по (10.35):

$$\Delta\vartheta_{\text{пов.л}} = \frac{P_{a\text{т}}\left(1-\frac{2l_\delta}{l_{a\text{ср}}}\right)}{2S_{\text{л}}\alpha_{\text{л}}} = \frac{195\left(1-\frac{2\cdot157\cdot10^{-3}}{630\cdot10^{-3}}\right)}{2\cdot47{,}8\cdot10^{-3}\cdot84} = 12{,}2°\text{C}$$

где $S_{\text{л}} = 2\pi D l_{\text{выл}} = 2\pi\cdot156\cdot10^{-3}\cdot48{,}8\cdot10^{-3} = 47{,}8\cdot10^{-3}\text{м}^2$

$l_{\text{выл}} = 0{,}4\tau = 0{,}4\cdot122\cdot10^{-3} = 48{,}8\cdot10^{-3}\text{м}$

$\alpha_{\text{л}} = 84\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot°\text{C})$ по рис.10.4.

154. Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки якоря по (10.37):

$$\Delta\vartheta_{\text{из.л}} = \frac{P_{a\text{т}}\left(1-\frac{2l_a}{l_{a\text{ср}}}\right)}{S_{\text{из.л}}} \cdot \left(\frac{h_{\text{п}}}{8\lambda'_{\text{экв}}}\right) = \frac{195\left(1-\frac{2\cdot157\cdot10^{-3}}{630\cdot10^{-3}}\right)}{33{,}2\cdot10^{-2}} \cdot \left(\frac{26\cdot10^{-3}}{8\cdot1{,}4}\right) = 0{,}7°\text{C}$$

где $S_{\text{из.л}} = 2Z\Pi l_{\text{л}} = 2\cdot29\cdot36{,}2\cdot10^{-3}\cdot158\cdot10^{-3} = 33{,}2\cdot10^{-2}\text{м}^2$

$\Pi_{\text{из.л}} = \left(1+\frac{\pi}{2}\right)(r_1+r_2)+h_1 = \left(1+\frac{\pi}{2}\right)(4{,}5\cdot10^{-3}+2{,}5\cdot10^{-3}) +$

$+18{,}2\cdot10^{-3} = 36{,}2\cdot10^{-3}\text{м}$

155. Потери, отводимые охлаждающим внутри объема машины воздухом и наружной поверхностью машины по (10.18):

$P_{\text{нар}} = 0{,}1\left(P_{\text{вт}}+P_{\text{дт}}\right) = 0{,}1\cdot(410+532) = 94\ \text{Вт}$

156. Потери, отводимые охлаждающим воздухом из внутреннего объема машины по (10.21):

$\Sigma P' = \Sigma P - P_{\text{нар}} = 1484-94 = 1390\ \text{Вт}$

где $\Sigma P = P_1 - P_{\text{н}} = 1484\ \text{Вт}$ для двигателей исполнения IP22 (см.§10).

157. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды по (10.38):

$\Delta\vartheta_{\text{воз}} = \frac{\Sigma P'}{S_{\text{охл}}\alpha_{\text{н}}} = \frac{1390}{24{,}8\cdot10^{-2}\cdot650} = 8{,}6°\text{C}$

где $S_{\text{охл}} = \pi D_{\text{н}}(l_\delta + 2l_{\text{выл}}) = \pi\cdot310\cdot10^{-3}\cdot(157\cdot10^{-3} + 2\cdot48{,}8\cdot\cdot10^{-3}) = 24{,}8\cdot10^{-2}\text{м}^2$ – расчетное значение наружной поверхности охлаждения двигателя по (10.33)

$\alpha_{\text{н}} = 650\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot°\text{C})$ – коэффициент подогрева воздуха по рис.10.5.

158. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающего воздуха по (10.39):

$$\Delta\vartheta_{a\text{ср}} = (\Delta\vartheta_a + \Delta\vartheta_{\text{из.п}})\frac{2l_\delta}{l_{a\text{ср}}} + (\Delta\vartheta_{\text{пов.л}} + \Delta\vartheta_{\text{из.л}})\cdot\left(1 - \frac{2l_a}{l_{a\text{ср}}}\right) + \Delta\vartheta_{\text{воз}} =$$

$$= (28 + 1{,}5)\cdot\frac{2\cdot157\cdot10^{-3}}{630\cdot10^{-3}} + (12{,}2 + 0{,}7)\cdot\left(1 - \frac{2\cdot157\cdot10^{-3}}{630\cdot10^{-3}}\right) + 8{,}6 =$$

$29{,}8°\text{C}$

159. Превышение температуры наружной поверхности обмотки возбуждения по (10.40):

$\Delta\vartheta_{\text{в}} = \frac{0{,}9P_{\text{в.т}}}{2pS_{\text{в}}\alpha_{\text{в}}} = \frac{0{,}9\cdot410}{4\cdot52\cdot10^{-3}\cdot44} = 40{,}3°\text{C}$

где $S_{\text{в}} = l_{\text{в.ср}}\Pi_{\text{в}} = 520\cdot10^{-3}100\cdot10^{-3} = 52\cdot10^{-3}\text{м}^2$

$\Pi_{\text{в}} = 100\cdot10^{-3}\text{м}$ – по эскизу межполюсного окна рис.3 (см.§10)

$\alpha_{\text{в}} = 44\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot°\text{C})$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки возбуждения (рис.10.4)

160. Перепад температуры в изоляции катушки обмотки возбуждения по (10.41):

$\Delta\vartheta_{\text{из.в}} = \frac{0{,}9P_{\text{в.т}}}{2pS_{\text{в}}}\left(\frac{b_{\text{в}}}{8\lambda_{\text{экв}}'} + \frac{b_{\text{из.в}}}{\lambda_{\text{экв}}}\right) = \frac{0{,}9\cdot410}{4\cdot52\cdot10^{-3}}\left(\frac{25\cdot10^{-3}}{8\cdot1{,}4} + \frac{0{,}2\cdot10^{-3}}{0{,}16}\right) = 6{,}1°\text{C}$

где $b_{\text{в}}$ – средняя ширина катушки.

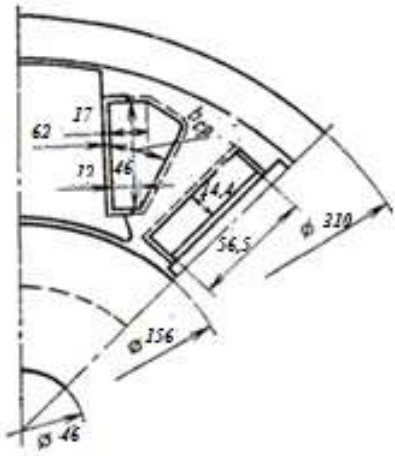


Рис.3. Эскиз межполюсного окна двигателя

161. Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды по (10.42):

$\Delta\vartheta_{\text{в.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{в}} + \Delta\vartheta_{\text{из.в}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} = 40{,}3 + 6{,}1 + 8{,}6 = 55°\text{C}$

162. Превышение температуры наружной поверхности добавочного полюса над температурой воздуха внутри машины по (10.43):

$\Delta\vartheta_{\text{п.д}} = \frac{0{,}9P_{\text{д.т}}}{2p_{\text{д}}S_{\text{д}}\alpha_{\text{д}}} = \frac{0{,}9\cdot 532}{4\cdot 23{,}84\cdot 10^{-3}\cdot 44} = 114°\text{C}$

где $S_{\text{д}} = l_{\text{д.ср}}\Pi_{\text{д}} = 392\cdot 10^{-3}\cdot 60{,}82\cdot 10^{-3} = 23{,}84\cdot 10^{-3}\,\text{м}^2$

$\Pi_{\text{в}} = 60{,}82\cdot 10^{-3}$м – по эскизу межполюсного окна рис.3 (см.§10)

$\alpha_{\text{д}} = \alpha_{\text{в}} = 44\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot°\text{C})$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки.

163. Перепад температуры в изоляции катушек добавочного полюса по (10.44):

$\Delta\vartheta_{\text{из.д}} = \frac{0{,}9P_{\text{д.т}}}{2p_{\text{д}}S_{\text{д}}}\left(\frac{b_{\text{кт.д}}}{8\lambda_{\text{экв}}'} + \frac{b_{\text{из.д}}}{\lambda_{\text{экв}}}\right) = \frac{0{,}9\cdot 532}{4\cdot 23{,}84\cdot 10^{-3}}\cdot\left(\frac{14{,}4\cdot 10^{-3}}{8\cdot 1{,}4} + \frac{0{,}25\cdot 10^{-3}}{0{,}16}\right) =$

$14{,}3°\text{C}$

164. Среднее превышение температуры обмоток добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды по (10.45):

$\Delta\vartheta_{\text{д.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{д}} + \Delta\vartheta_{\text{из.д}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} = 114 + 14{,}3 + 8{,}6 = 137°\text{C}$

165. Превышение температуры наружной поверхности коллектора над температурой воздуха внутри машины по (10.50):

$\Delta\vartheta_{\text{к}} = \frac{\Delta\left(P_{\text{щ}}+P_{\text{т.щ}}\right)}{S_{\text{к}}\alpha_{\text{к}}} = \frac{198+67{,}6}{24{,}4\cdot 10^{-3}\cdot 220} = 49{,}5°\text{C}$

где $S_к = \pi D_к l_к = \pi \cdot 112 \cdot 10^{-3} \cdot 58 \cdot 10^{-3} = 20{,}4 \cdot 10^{-3}$м^2
$\alpha_к = 220$ Вт/(м$^2 \cdot$ °С) – коэффициент теплоотдачи с поверхности коллектора (рис.10.6).

Таким образом, превышение температуры обмотки якоря, обмотки возбуждения и коллектора ниже предельно-допустимых значений для класса изоляции В (см. табл. 10.1). Для проводников обмотки добавочных полюсов марки ПСД (класс изоляции F) среднее превышение температуры так же не превышает предельно-допустимого значения (155°С).

Вентиляционный расчет

Разрабатываемый двигатель имеет аксиальную систему вентиляции с самовентиляцией, обеспечиваемой встроенным вентилятором центробежного типа.

166. Необходимое количество воздуха по (11.1):

$Q_{воз} = \frac{\Sigma P'}{c_в \cdot 2\Delta\vartheta_{воз}} = \frac{1390}{1100 \cdot 2 \cdot 8{,}6} = 0{,}073$ м^3

где $c_в = 1100$ Дж/(°С $\cdot$ м^3) – удельная теплоемкость воздуха.

167. Принимаем наружный диаметр центробежного вентилятора равным приблизительно $0{,}9d_с$ (см.§11):

$D_{2в} = 0{,}9d_с = 0{,}9 \cdot 278 \cdot 10^{-3} = 250 \cdot 10^{-3}$м

168. Окружная скорость вентилятора по наружному диаметру по (11.3):

$v_2 = \frac{\pi D_{2в} n}{60} = \frac{\pi \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 1500}{60} = 19{,}6$ м/с

169. Внутренний диаметр колеса вентилятора из условия, что $\frac{D_{2в}}{D_{1в}} = (1{,}2 \div 1{,}5)$ (см.§11):

$D_{1в} = \frac{D_{2в}}{1{,}25} = 200 \cdot 10^{-3}$м

170. Окружная скорость вентилятора по внутреннему диаметру:

$v_1 = \frac{\pi D_{1в} n}{60} = \frac{\pi \cdot 200 \cdot 10^{-3} \cdot 1500}{60} = 15{,}7$ м/с

171. Ширина лопаток вентилятора:

$b_{лв} = (0{,}12 \div 0{,}15) D_{2в} = 0{,}15 \cdot 250 \cdot 10^{-3} = 37{,}5 \cdot 10^{-3}$м

172. Число лопаток вентилятора принимаем $N_л = 17$ (см.§11).

173. Давление вентилятора на холостом ходе по (11.10):

$H_0 = \eta_a \rho (v_2^2 - v_1^2) = 0{,}6 \cdot 1{,}2 \cdot (19{,}6^2 - 15{,}7^2) = 99$Па

где $\eta_a = 0{,}6$ – аэродинамический КПД вентилятора

$\rho = 1{,}2$ кг/м^3 – плотность воздуха.

174. Максимально возможное количество воздуха в режиме короткого замыкания:

$Q_{max} = 0{,}42 v_2 S_2 = 0{,}42 \cdot 19{,}6 \cdot 27 \cdot 10^{-3} = 0{,}222$ м^3/с

где $S_2 = 0{,}92 \pi D_{2в} b_{лв} = 0{,}92 \cdot \pi \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 37{,}5 \cdot 10^{-3} = 27 \cdot 10^{-3}$ м^2 - входное сечение вентилятора.

175. Аэродинамическое сопротивление вентиляционной системы машины (см. рис. 11.1): $Z = 14 \cdot 10^3$ Па $\cdot$ с^2/м^6

176. Действительный расход воздуха по (11.13):

$Q_{воз} = Q_{max} \sqrt{\frac{H_0}{H_0 + Z Q_{max}^2}} = 0{,}222 \cdot \sqrt{\frac{99}{99 + 14 \cdot 10^3 \cdot 0{,}222^2}} = 0{,}079$ м^3/с

177. Действительное давление вентилятора по (11.2):

$H = Z Q_{воз}^2 = 14 \cdot 10^3 \cdot 0{,}079^2 = 87$ Па

178. Мощность, потребляемая вентилятором по (11.14):

$P_{вент} = \frac{H Q_{воз}}{\eta_э} = \frac{87 \cdot 0{,}079}{0{,}2} = 34{,}4$ Вт

где $\eta_э = 0{,}18 \div 0{,}2$ – энергетический КПД вентилятора.

Элементы конструкции

Станина. Станина выполнена из цельнотянутой стальной трубы.

Магнитопровод статора выполнен шихтованным из листов электротехнический стали толщиной 0,5 мм и запрессован в корпус.

Опорные лапы изготовлены отдельно от станины и привариваются к ней.

На станине приварены основания для размещения коробки выводов.

В верхней части станины установлен один рым-болт.

Станина оснащена зажимом для заземления.

На торцах станины выполнены кольцевые заточки и ушки с нарезными отверстиями для крепления подшипниковых щитов.

Вал. Электрическая машина выполнена с горизонтальным расположением вала.

Вал изготовлен из стали марки 45.

Вал имеет ступенчатую форму с большим диаметром в месте посадки магнитопровода якоря.

Диаметр вала под магнитопровод $d_с = D_0 = 46 \cdot 10^{-3}$ м (по п.49).

Число ступеней вала - 6 (подшипники, коллектор, магнитопровод, вентилятор, свободный конец вала). При переходе с одного диаметра на

другой в местах переходов предусмотрены закругления (галтели) радиусом $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.

Диаметр якоря под коллектор и под вентилятор:

$$d_к = d_в = \frac{d_с}{1{,}13} = \frac{46 \cdot 10^{-3}}{1{,}13} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Диаметр якоря под подшипники и подшипниковые щиты (предварительно):

$$d_п = \frac{d_к}{1{,}13} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{1{,}13} = 35 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Выбираем подшипники качения шариковые радиальные однорядные 206 $d_п = 35 \cdot 10^{-3}$ м. (по приложению П 5.1).

Свободный конец вала имеет цилиндрическую форму. Диаметр свободного конца вала (предварительно):

$$d = \frac{d_п}{1{,}13} = \frac{35 \cdot 10^{-3}}{1{,}13} = 31 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Принимаем $d = 28 \cdot 10^{-3}$ м (по табл. 12.1). Выбираем длинный конец вала $l_0 = 60 \cdot 10^{-3}$м.

Подшипниковые щиты. Подшипники располагаются в подшипниковых щитах, которые располагаются по торцам машины и предназначаются для прикрытия лобовых частей обмоток. подшипниковые щиты выполняются литыми, присоединяются к корпусу с помощью болтов.

Полюсы. Главные и добавочные полюсы размещаются на статоре.

Главные полюсы машин собирают из отдельных листов, которые штампуют из электротехнической стали толщиной 1 мм. Собранные в пакет, они спрессовываются при давлении $(20 \div 25) \cdot 10^5$ Па и скрепляются заклепками. Крайние листы пакета выполняются более толстыми. Они штампуются из листовой стали толщиной 4 мм. Эти листы по размеру делаются несколько меньшими, чем остальные.

Заклепки вставляются в предусмотренные в листах отверстия в количестве четырех штук, а затем развальцовываются в конических углублениях листов. Диаметры отверстий под клепки принимаются 6,2 мм. Для полюсов применяются заклепки диаметром 6 мм.

Полюсы прикрепляются к станине болтами.

Добавочные полюсы выполняются цельными в виде стальных отливок. Сердечник полюса и его наконечник выполняются из одной заготовки путем ее последующей обработки.

Якорь. Магнитопровод якоря собирают из целых листов, которые вырубаются из электротехнической стали толщиной 0,5 мм. В листе штампуют пазы и круглые отверстия диаметр 15 мм для образования вентиляционных каналов. Для посадки магнитопровода на вал в центре листа штампуются отверстие, в котором предусматривается шпоночная

канавка. Магнитопровод якоря набирают из листов непосредственно на вал. Магнитопровод спрессовывают стальными нажимными шайбами, которые имеют обмоткодержатели, предназначенные для поддержки лобовых частей обмотки.

Магнитопровод якоря в спрессованном состоянии фиксируется на валу с помощью втулок, насаживаемых на вал с большим натягом. Для фиксации магнитопровод с одной стороны упирается в предусмотренный на валу буртик. Лобовые части обмотки закрепляют бандажом.

Для бандажей применяют стальную немагнитную проволоку диаметром 1,0 мм.

Под проволочными бандажами на пазовой и лобовой частях обмотки якоря подкладывают миканит толщиной 0,3 мм.

Коллектор. Коллектор состоит из коллекторных пластин, которые изготовляют из твердотянутой меди трапецеидального сечения толщиной 5 мм. Для изоляции пластин друг от друга между ними укладывают прокладки из специального коллекторного миканита толщиной 1,0 мм. Набор коллекторных пластин с изоляцией между ними должен быть прочно закреплен и иметь строго цилиндрическую форму. Крепление пластин осуществляется нажимными конусными фланцами.

Коллекторные пластины выполняют в виде ласточкина хвоста. Изоляционные прокладки между пластинами — такой же формы.

Применяется коллектор арочного типа.

Размеры коллекторной пластины см. рис. 12.19:

- высота коллекторной пластины по (12.64):

$h_к = (0{,}8 \div 1{,}15)\sqrt{D_к} = 1{,}15\sqrt{112 \cdot 10^{-3}} = 12 \cdot 10^{-3}$м

- высота ласточкина хвоста по (12.65):

$h_1 = (0{,}5 \div 0{,}55)h_к = 0{,}5 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-3}$м.

Длины участков коллектора:

$l_4 \geq (1{,}2 \div 1{,}6)h_1 = 1{,}6 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 9{,}6 \cdot 10^{-3}$м

Ширина выточки $l_1 = 6 \cdot 10^{-3}$м.

$l_2 = 14 \cdot 10^{-3}$м.

Толщина миканитовых манжет равна 1мм, а миканитового цилиндра 0,75 мм.

Профиль ласточкина хвоста задается углами α и β, которые равны соответственно 30 и 3°.

Число шпилек для стягивания нажимных фланцев - 12. Диаметр шпилек 16 мм.

Токосъемный аппарат. Токосъемный аппарат состоит из щеток, щеткодержателей, щеточных пальцев и траверсы.

Щеткодержатели выполняют из латуни. Применяются радиальные щеткодержатели. Щеткодержатели укрепляют на щеточных пальцах с

помощью колодок. Пальцы представляют собой цилиндрические стержни.

Щеточные пальцы крепят к траверсе. Траверса имеет возможность перемещения по окружности в целях установки щеток на геометрическую нейтраль при сборке и наладке машины. Траверсу закрепляют на специальной заточке подшипникового щита стяжными и стопорными болтами.

Сборочный чертеж двигателя приведен на листе графической части (см. приложение 7 П.7.7).

Приложение 1.

Высота оси вращения для машин серии 2П

высота оси вращения h, мм	мощность $P_н$, кВт, при различных значениях частоты вращения $n_н$, об/мин					
	3000	2200	1500	1000	750	600
двигатели исполнения по защите IP22 со способом охлаждения IC01						
80	0,75 1,1	0,55 0,75	0,37 0,55	0,18 0,25	0,12 0,18	0,09 0,12
90	- 1,5	- 1,1	- 0,75	0,37 0,55	0,25 0,37	0,18 0,25
100	2,2 3,0	1,5 2,2	1,1 1,5	- 0,75	- 0,55	- 0,37
112	4,0 5,5	3,0 4,0	2,2 3,0	1,1 1,5	0,75 1,1	0,55 0,75
132	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	2,2 3,0	1,5 2,2	1,1 1,5
160	15 18,5 22	11 15 18,5	7,5 11 -	4,0 5,5 7,5	3,0 4,0 5,5	2,2 3,0 4,0
180	30 37	22 30	15 18,5	- 11	- 7,5	- 5,5
200	45 55	37 45	22 30	12 18,5	- 11	- 7,5
двигатели исполнения по защите IP44 со способом охлаждения IC0141						
80	0,55 0,75	0,37 0,55	0,25 0,37	0,18 0,25	0,12 0,18	- -
90	1,1 1,5	0,75 1,1	0,55 0,75	0,37 0,55	0,25 0,37	- -
112	2,2 3,0	1,5 2,2	1,1 1,5	0,75 1,1	0,55 0,75	- -
132	4,0 5,5	3,0 4,0	2,2 3,0	1,5 2,2	1,1 1,5	- -
160	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	3,0 4,0	2,2 3,0	- -
180	15 18,5	11 15	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	- -
200	22 30	18,5 22	- 15	- 11	- 7,5	- -

Приложение 2.

Обмоточные провода

П.2.1. 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	0,1	0,00502
0,09	0,11	0,00636
0,1	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	0,2	0,0227
0,18	0,21	0,0255
(0,19)	0,22	0,0284
0,2	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)	0,3	0,0552
0,28	0,315	0,0616
(0,3)	0,335	0,0707
0,315	0,35	0,0779
0,335	0,37	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,4	0,44	0,1257
0,425	0,565	0,1419
0,45	0,49	0,159
(0,475)	0,515	0,1772
0,5	0,545	0,1963
(0,53)	0,585	0,221
0,56	0,615	0,246
0,6	0,655	0,283
0,63	0,69	0,312

продолжение П.2.1.

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2
(0,67)	0,73	0,353
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442
0,8	0,865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,9	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,2	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
1,5	1,585	1,767
1,6	1,685	2,011
1,7	1,785	2,27
1,8	1,895	2,54
1,9	1,995	2,83
2	2,095	3,14
2,12	2,22	3,53
2,24	2,34	3,94
2,36	2,46	4,36
2,5	2,6	4,91

П.2.2. Размеры и площадь поперечного сечения прямоугольной проволоки

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм																	
	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм^2																	
2	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	—	—	—	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,16	—	2,435	—	2,753	—	—	—	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,16	1,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—
2,36	1,751	—	1,95	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—
2,5	1,863	1,97	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,91	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—
2,8	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—
3	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	5,638	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,51	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,11	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—
4	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,263	—	3,551	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—
4,5	3,463	3,67	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,41	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—
5	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,3	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,41	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—
5,6	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	8,101	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—
6,3	4,90	5,2	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,66	9,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,7	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,16	—	9,165	—	10,51	—	11,7	—	13,04	—
7,1	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,66	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,5	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,16	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—
8	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,6
8,5	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—
9	—	—	—	—	—	—	9,865	10,41	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	11,66	—	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,47	16,59	17,71	18,68	19,8	20,92	22,04	23,38
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

продолжение П.2.2.

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм																
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6
	Расчетное сечение проволоки, мм^2																
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	6,693	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,35	7,141	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,55	7,589	7,829	8,326	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,75	8,037	—	8,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	8,897	8,891	9,451	10,65	10,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	9,157	—	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,5	9,717	10,07	10,7	11,38	12,05	12,95	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	10,28	—	11,33	—	12,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	10,84	11,25	11,95	12,7	13,45	14,45	15,2	16,2	17,2	—	—	—	—	—	—	—	—
5,3	11,51	—	12,7	—	14,29	—	16,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,6	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6	13,08	—	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,3	13,75	14,32	15,2	16,15	17,09	18,35	19,3	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,7	14,65	—	16,2	—	18,21	—	20,56	—	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,1	15,54	16,21	17,2	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,5	16,44	—	18,2	—	20,45	—	23,08	—	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,5	18,68	—	20,7	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9	19,8	20,69	21,95	23,3	24,65	26,54	27,8	29,6	31,4	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,5	20,92	—	23,2	—	26,05	—	29,38	—	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10	22,04	23,05	25,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,6	23,38	—	25,95	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,5
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,79	49,54	52,34	55,14	58,5	61,86
11,8	26,07	—	28,95	—	32,49	—	36,62	—	41,24	—	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22
12,5	27,64	24,95	30,7	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

продолжение П.2.2.

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм												
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,8	4	4,1	4,25	4,4	4,5	4,7	4,75
	Расчетное сечение проволоки, мм^2												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,2	—	36,97	—	39,21	41,14	—	43,94	—	46,74	—	49,54	—	52,34
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,8	—	—	—	41,34	—	—	46,34	—	—	—	52,24	—	—
12,5	—	41,35	—	43,83	46,02	—	49,14	—	52,27	—	55,39	—	58,52
13,2	—	—	—	46,31	—	—	51,94	—	—	—	58,54	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	—	46,35	—	49,15	51,95	—	55,14	—	58,64	—	62,14	—	66,64
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	52,7	—	—	59,14	—	—	—	66,64	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	53,05	—	56,25	59,14	—	63,14	—	67,14	—	71,14	—	75,14
16,8	54,62	—	58,82	—	—	63,36	—	68,02	—	73,06	—	78,1	—
18	58,56	—	63,06	—	—	67,92	—	72,94	—	78,34	—	83,74	—
19,5	63,48	—	68,35	—	—	73,62	—	79,09	—	84,94	—	90,79	—
20	—	—	—	—	—	—	79,52	—	—	—	—	—	—
22	71,68	—	77,18	—	—	83,12	—	89,34	—	95,94	—	102,54	—
25	81,52	—	87,77	—	—	94,52	99,52	101,64	—	109,14	—	116,4	—
26,3	—	—	92,36	—	—	99,46	—	106,97	—	114,86	—	122,75	—
28	—	—	—	—	—	105,92	111,94	113,94	—	122,34	—	130,74	—
30	—	—	—	—	—	113,52	119,52	122,14	—	131,14	—	140,14	—
32	—	—	—	—	—	—	—	130,34	—	139,94	—	149,54	—
35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	153,14	—	163,64	—

продолжение П.2.2.

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм												
	5	5,1	5,3	5,5	5,6	6	6,5	7	8	9	10	11	12,5
	Расчетное сечение проволоки, мм^2												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	96,34	—	—	—
11,2	55,14	—	58,50	—	61,86	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	103,64	—	—	—
11,8	58,14	—	—	—	65,22	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	61,64	—	65,39	—	69,14	—	—	—	99,14	111,64	124,14	136,66	155,41
13,2	65,14	—	—	—	73,06	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	93,64	107,14	120,64	—	—	—
14	69,14	—	73,34	—	77,54	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	93,39	100,64	115,14	129,64	—	—	—
15	74,14	—	—	—	83,14	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	—	—
16	79,14	—	83,94	—	88,74	95,14	—	—	127,14	—	—	—	—
16,8	—	84,82	—	91,54	—	99,94	108,34	116,74	133,54	—	—	—	—
18	—	90,94	—	98,14	—	107,14	116,14	125,14	143,14	—	—	—	—
19,5	—	98,59	—	106,39	—	116,14	125,89	135,64	155,14	—	—	—	—
20	99,14	—	—	—	—	119,14	—	—	159,14	—	—	—	—
22	—	111,34	—	120,14	—	131,14	142,14	153,14	—	—	—	—	—
25	124,14	126,64	—	136,64	—	149,14	161,64	174,14	—	—	—	—	—
26,3	—	133,27	—	143,79	—	158,94	170,09	183,24	—	—	—	—	—
28	—	141,94	—	153,14	—	167,14	181,14	195,14	—	—	—	—	—
30	149,14	152,14	—	164,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	162,34	—	175,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

П.2.2. Максимальная толщина изоляции обмоточных проводов

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции при диаметрах голого провода d, мм							
	0,05÷ 0,09	0,1÷ 0,19	0,2÷ 0,25	0,265÷ 0,3	0,315÷ 0,355	0,375÷ 0,5	0,53÷ 0,71	0,75÷ 0,95
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
АПБД	—	—	—	—	—	—	—	—
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18
ПЭЛШ ПЭЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,1	0,105	0,11	0,115	0,125
ПСД, ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18	0,19	0,2
ПСДКТ	—	—	—	—	0,14	0,14	0,16	0,16
ПДА	—	—	—	—	—	—	—	—
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП	—	—	—	—	—	—	—	—
ППТБО, ППЛБО	—	—	—	—	—	—	—	—

продолжение П.2.2

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции при диаметрах голого провода d, мм					прямоугольного провода при меньшей стороне сечения голого провода, мм		
	1÷ 1,4	1,5÷ 1,6	1,7÷ 2,12	2,24÷ 5	5÷ 5,2	0,85÷ 1,9	2,12÷ 3,75	4÷ 5,6
ПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
АПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
ПЭЛБО	0,21	0,21	0,21	—	—	—	—	—
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,135	0,155	0,155	—	—	—	—	—
ПСД, ПСДК	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,4
ПСДТ	0,21	0,21	0,23	—	—	—	—	—
ПСДКТ	0,18	0,18	—	—	—	0,22	—	—
ПДА	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП	—	—	—	—	—	0,1—0,12	0,15	—
ППТБО, ППЛБО	—	—	—	—	—	0,45	0,45	0,5

Приложение 3.

Кривые намагничивания сталей

В связи с некоторым расхождением магнитных характеристик электротехнических сталей одинаковых марок, выпускаемых различными предприятиями, в табл. П 3.1— П 3.10 приводятся усредненные цифры, которые могут быть использованы при учебном проектировании. Для расчетов двигателей для производственных целей рекомендуется пользоваться уточненными кривыми намагничивания конкретной стали, которую предполагается применить для проектируемого двигателя.

П.3.1. Листовая электротехническая сталь марок 1211, 1212, 1311 (слабо- и среднелегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	153	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	859	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1010	1040	1070	1100
1,3	1149	1180	1220	1260	1300	1340	1380	1430	1480	1530
1,4	1580	1640	1710	1780	1860	1950	2050	2150	2260	2380
1,5	2500	2640	2790	2950	3110	3280	3460	3660	3880	4120
1,6	4370	4630	4910	5220	5530	5880	6230	6600	6980	7370
1,7	7780	8200	8630	9070	9630	10100	10600	11 100	11 600	12200
1,8	12800	13400	14200	14600	15200	15900	16600	17300	18000	18800
1,9	19700	20600	21600	22600	23600	24600	25600	26800	28200	29600
2	31000	32500	34300	36500	39000	42000	45500	49500	54500	59500
2,1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304 000	312000	320 000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000
2,5	384000	392000	400000	408000	416000	424000	432000	440000	448000	456000

П.3.2 Листовая электротехническая сталь марок 1411, 1412, 1413 (повышенно-легированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,2	44	45	47	48	49	50	51	52	54	55
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0.9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211
1	217	223	230	237	241	252	260	269	278	288
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686
1,3	722	760	800	850	900	960	1030	1110	1200	1300
1,4	1410	1530	1660	1810	1970	2140	2320	2510	2710	2920
1,5	3140	3370	3610	3870	4140	4420	4710	5010	5320	5640
1,6	5980	6330	6700	7090	7500	7930	8380	8850	9340	9860
1,7	10100	11000	11600	12300	13000	13700	14500	15300	16200	17100
1,8	18 100	19100	20200	21400	22700	24100	25600	27200	29000	31 100
1,9	33500	36300	39700	43700	48300	53700	59700	66200	73200	80600
2	88300	96100	104000	112000	120000	128000	136000	144000	151000	159000
2,1	167000	175000	183000	191000	199000	207000	215000	223000	231000	239000
2,2	246000	254000	262000	270000	278000	286000	294000	302000	310000	318000
2,3	326000	334000	342000	350000	358000	365000	373000	381000	389000	397000
2.4	405000	413000	421000	429000	437000	445000	—	—	—	—

П.3.3. Листовая электрическая сталь марок 1511, 1512, 1513 (высоколегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	96	97	98	99	100	102	104	106	108	111
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0,8	254	261	268	275	282	289	296	303	310	317
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404
1	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707
1,2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1030
1,3	1080	1140	1200	1270	1340	1410	1490	1590	1600	1720
1.4	1940	2060	2200	2340	2500	2700	2920	3140	3370	3600
1,5	3850	4060	4290	4520	4760	5000	5300	5650	6000	6350
1.6	6700	7100	7600	8100	8650	9300	10000	10700	11400	12200
1,7	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000
1,8	23000	24000	25000	26000	27000	28000	29000	30000	31200	32500
1,9	34000	35500	37000	38500	40500	42500	45000	51000	57000	63000
2	70000	77000	84500	92000	100000	108000	116000	124000	138000	140000
2,1	148000	156000	164000	172000	180000	188000	196000	204000	212000	220000
2,2	228000	236000	244000	252000	260000	268000	276000	284000	292000	300000

Примечание. Для индукции свыше 2,06 Тл кривая намагничивания выражается уравнением $B = 1{,}9140 + 1{,}256 \cdot H \cdot 10^{-6}$

П.3.4. Листовая электротехническая сталь (хладнокатаная) марки 3413

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,6	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99
0,7	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128
0,8	130	132	134	136	138	140	142	144	146	149
0,9	152	155	158	161	164	167	170	173	176	179
1	182	185	188	192	195	198	201	204	207	210
1,1	213	216	219	222	225	228	231	234	237	240
1,2	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271
1,3	275	279	283	287	291	295	300	305	310	315
1,4	320	326	332	338	344	350	358	366	374	382
1,5	390	402	414	426	438	450	464	478	492	506
1.6	520	544	566	588	610	632	665	698	732	766
1,7	800	840	890	940	990	1040	1132	1224	1316	1408
1,8	1500	1542	1700	1922	2144	2366	2S88	2820	3080	3450
1,9	3825	4200	4600	5200	5800	7000	8200	9400	10900	13400
2	16000	20000	25000	30000	—	—	—	—	—	—

П.3.5. Основная кривая намагничивания (сталь 2013)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,3	620	670	780	890	1000	ИЗО	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11 200	11 800	12400
1,9	13000	13600	14200	14 800	15600	16500	17300	18100	18900	19800
2	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2,1	60000	67000	74000	81000	88000	95000	102000	109000	116000	123000
2.2	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2,3	210000	218000	226000	234000	242000	250000	258000	266000	274000	282000
2,4	290000	298000	306000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

П.3.6. Основная кривая намагничивания (стали 2212, 2214 и 2312)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0.04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100
1,6	3400	3600.	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6500	7100
1,7	7700	8200	8900	9400	10000	10600	11 100	11 700	12200	12800
1,8	13400	14000	14600	15200	15800	16400	17000	17600	18200	18800
1,9	19400	20000	21800	23700	25700	27800	30000	32200	34400	36600
2	38800	41000	43200	45400	47600	49800	52000	54500	57500	60500
2,1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304000	312000	320000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000

П.3.7. Основная кривая намагничивания (сталь 2412)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	305	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1000	1070	1150
1,4	1230	1320	1420	1520	1630	1750	1870	2010	2160	2320
1,5	2500	2680	2870	3080	3300	3540	3800	4090	4380	4700
1,6	5000	5380	5760	6200	6650	7120	7650	8200	8800	9400
1,7	10000	10500	11000	11 500	12000	12500	13 100	13700	14300	14900
1,8	15600	16200	16800	17500	18300	19100	20000	20900	21 900	22900
1,9	23900	25000	26200	27400	28700	30000	32000	36000	42000	50000
2	59000	68000	77000	86000	95000	104000	113000	122000	131 000	140000
2,1	149000	158000	167000	176000	185000	194000	203000	212000	221 000	230000
2,2	239000	248000	257000	266000	275000	284000	293000	302000	311 000	320000
2,3	329000	333800	347000	356000	365000	374000	383000	392000	401 000	410000
2,4	419000	428000	437000	446000	455000	464000	473000	482000	491000	500000

П.3.8. Листовая сталь (Ст3) толщиной 1-2 мм (для полюсов)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,1	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,2	140	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,3	180	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,4	210	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,5	250	—	—	—	—	275	—	—	—	—
0,6	295	—	—	—	—	320	—	—	—	—
0,7	345	—	—	—	—	375	—	—	—	—
0,8	405	—	—	—	—	440	—	—	—	—
0,9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1	570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
1,1	690	703	720	731	748	760	775	790	808	825
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1015	1045
1,3	1080	1112	1145	1175	1220	1260	1300	1350	1393	1450
1,4	1490	1530	1595	1645	1700	1750	1835	1920	2010	2110
1,5	2270	2450	2560	2710	2880	3050	3200	3400	3650	3750
1.6	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5580	5950	6230	6600
1,7	7050	7530	7950	8400	8850	9320	9800	10300	10800	11400
1,8	11900	12400	13000	13500	14100	14800	15600	16200	17000	17800
1.9	18800	19700	20700	21 500	22600	23500	24500	25600	26500	27500
2	29000	30200	31500	32800	34200	36100	38000	—	—	—

П.3.9. Литая сталь, толстые листы (Ст3), поковки

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	539	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	639	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1	924	938	953	969	986	1004	1022	1039	1056	1073
1.1	1090	1108	1127	1147	1167	1187	1207	1227	1248	1269
1,2	1290	1315	1340	1370	1400	1430	1460	1490	1520	1555
1,3	1590	1630	1670	1720	1760	1810	1860	1920	1970	2030
1,4	2090	2160	2230	2300	2370	2440	2530	2620	2710	2800
1,5	2890	2990	3100	3210	3320	3430	3560	3700	3830	3960
1,6	4100	4250	4400	4550	470(1	4870	5000	5150	5300	5500

П.3.10. Кривая намагничивания для полюсов (сталь 3411)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
1	170	170	180	185	190	190	200	200	210	210
1,1	220	220	230	235	240	240	250	260	260	270
1,2	280	290	300	310	320	320	330	340	350	360
1,3	370	380	400	410	420	430	450	460	470	480
1,4	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
1,5	700	730	760	790	820	850	880	910	940	970
1,6	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
1,7	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2800	3100	3400	3700
1,8	4000	4300	4600	5000	5400	5900	6500	7100	7800	8500
1,9	9200	10000	11 200	13000	15500	19000	22500	26000	30000	35000
2	40000	45000	50000	55000	60000	—	—	—	—	—

Приложение 4.

Щетки для электрических машин

П.4.1. Шкала размеров электрощеток (в миллиметрах), $b_{щ} \times l_{щ} \times h_{щ}$

Тангенциальный размер $b_{щ}$	Осевой размер $l_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12,5	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	20	20	20	20	—	—	—	—	—
5	—	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	20	20	20	20	—	—	—	—	—
	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	32	32	32	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	—	—	—	—
6,3	—	—	20	20	20	—	—	—	—	—	—
	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—
8	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—
	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	—	—
10	—	—	—	—	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	—
12,5	—	—	—	—	—	25	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
16	—	—	—	—	—	—	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
20	—	—	—	—	—	—	—	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64

продолжение П.4.1.

Тангенциальный размер $b_{щ}$	Осевой размер $l_{щ}$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
25	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80
40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100

Примечание. Щетки шириной 25 мм и выше подразделяются на две.

П.4.2. Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего назначения

Обозначение марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность, А/см^2	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
Г-20	Угольно-графитные	2,9	15	40	50	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г-21		4,3	5	30	15 -100	
Г-22		2,5	10	30	40	
Г3	Графитные	1,9	11	25	20-25	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
611М		2	12	40	20-25	
6110М		2	15	90	12-22	
ЭГ2А	Электрографитированные	2,6	10	45	20-25	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2АФ		2,2	15	90	15-21	
ЭГ4		2	12	40	15-20	
ЭГ8		2,4	10	40	20-40	
ЭГ14		2,5	11	40	20-40	
ЭГ51		2,2	12	60	20-25	
ЭГ61		3	13	60	35-50	
ЭГ71		2,2	12	40	20-25	
ЭГ74		2,7	15	50	17,5-25	
ЭГ74АФ		2,3	15	60	15-21	
ЭГ85		2,3	15	50	17,5-35	

продолжение П.4.2.

Обозначение марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность, $А/см^2$	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
М1	Металло-графитные	1,5	15	25	15-20	Низковольтные генераторы и контактные кольца
М3		1,8	12	20	15-20	
М6		1,5	15	25	15-20	
М20		1,4	12	20	15-20	
МГ		0,2	20	20	18-23	
МГ2		0,5	20	20	18-23	
МГ4		1,1	15	20	20-25	
МГ64		0,5	25	25	15-20	
МГС0		0,2	20	20	18-23	
МГС5		2	15	35	20-25	

Примечание: 1. При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших частот вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа.

2. Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

3. Коэффициент трения щеток о коллектор принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

Приложение 5.

Подшипники качения

П 5.1. Шарикоподшипники радиальные однорядные (рис. 12.4). Обозначения см. § 12

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*b*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*, об/мин
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
Легкая серия							
200	10	30	9	1	4600	2610	20 000
201	12	32	10	1	4700	2650	20 000
202	15	35	11	1	5850	3470	16 000
203	17	40	12	1	7400	4400	16 000
204	20	47	14	1,5	9800	6200	12 500
205	25	52	15	1,5	10 800	6950	10 000
206	30	62	16	1,5	15 000	10 000	10 000
207	35	72	17	2	19 700	13 600	8000
208	40	80	18	2	25 100	17 800	6300
209	45	85	19	2	25 200	17 800	6300
210	50	90	20	2	27 000	19 800	6300
211	55	100	21	2,5	33 400	25 100	5000
212	60	110	22	2,5	40 400	30 900	5000
213	65	120	23	2,5	44 000	34 000	5000
214	70	125	24	2,5	48 000	37 400	4000
215	75	130	25	2,5	51 000	41 000	4000
216	80	140	26	3	56 000	44 500	4000
217	85	150	28	3	64 000	53 100	4000
218	90	160	30	3	74 000	60 500	3150
219	95	170	32	3,5	84 000	69 500	3150
220	100	180	34	3,5	94 000	79 000	3150
Средняя серия							
300	10	35	11	1	6250	3750	20 000
301	12	37	12	1,5	7500	4640	16 000
302	15	42	123	1,5	8750	5400	16 000
303	17	47	14	1,5	10 700	6670	12 500
304	20	52	15	2	12 250	7780	12 500
305	25	62	17	2	17 250	11 400	10 000
306	30	72	19	2	21 600	14 800	8000
307	35	80	21	2,5	25 700	17 550	8000
308	40	90	23	2,5	31 300	22 200	6300
309	45	100	25	2,5	37 000	26 200	6300
310	50	110	27	3	47 500	35 600	5000
311	55	120	29	3	55 000	41 800	5000
312	60	130	31	3,5	63 000	48 400	4000

продолжение табл. П 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8
313	65	140	33	3,5	71 300	55 600	4000
314	70	150	35	3,5	80 200	63 200	4000
315	75	160	37	3,5	87 500	71 500	3150
316	80	170	39	3,5	94 600	80 200	3150
317	85	180	41	4	102 000	89 400	3150
318	90	190	43	4	110 000	99 000	3150
319	95	200	45	4	117 000	109 000	2500
320	100	215	47	4	134 000	130 000	2500
321	105	225	49	4	141 000	142 000	2500
322	110	240	50	4	158 000	167 000	2500
324	120	260	55	4	167 000	180 000	2000
326	130	280	58	5	176 000	194 000	1600
Тяжелая серия							
403	17	62	17	2	17 500	11 900	10 000
405	25	80	21	2,5	28 600	20 400	8000
406	30	90	23	2,5	36 500	26 800	6300
407	35	100	25	2,5	43 000	31 300	6300
408	40	110	27	3	49 500	36 400	5000
409	45	120	29	3	59 300	45 500	5000
410	50	130	31	3,5	67 200	52 000	4000
411	55	140	33	3,5	77 300	62 500	4000
412	60	150	35	3,5	84 000	70 000	3150
413	65	160	37	3,5	91 000	78 000	3150
414	70	180	42	4	111 000	105 000	3150
415	75	190	45	4	117 000	115 000	3150
416	80	200	48	4	126 000	125 000	2500
417	85	210	52	5	134 000	136 000	2500

П 5.2. Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами (рис. 12.5)

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*, об/мин
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
Легкая узкая серия							
2202, 32202, 42202	15	35	11	1	5520	3020	16 000
2204, 32204, 42204	20	47	14	1,5	11 700	7250	12 500
2205, 32205, 42205	25	52	15	1,5	13 200	8450	10 000
2206, 32206, 42206	30	62	16	1,5	17 000	11 200	10 000
2207, 32207, 42207	35	72	17	2	25 000	17 200	8000
2208, 32208, 42208	40	80	18	2	33 000	23 500	8000
2209, 32209, 42209	45	85	19	2	34 300	25 200	6300
2210, 32210, 42210	50	90	20	2	38 000	28 600	6300

продолжение табл. П 5.2

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
2211, 32211, 42211	55	100	21	2,5	43 000	32 300	6300
2212, 32212, 42212	60	110	22	2,5	53 700	42 000	5000
2213,32213, 42213	65	120	23	2,5	61 000	47 600	5000
2214, 32214, 42214	70	125	24	2,5	67 500	47 700	4000
2215, 32215, 42215	75	130	25	2,5	76 500	60 000	4000
2216, 32216, 42216	80	140	26	3	78 000	62 300	4000
2217, 32217, 42217	85	150	28	3	97 000	80 900	3150
2218, 32218, 42218	90	160	30	3	119 000	99 000	3150
— , 32219, 42219	95	170	32	3,5	130 000	109 000	3150
2220, 32220, —	100	180	34	3,5	132 500	109 000	2500
— , 32221, 42221	105	190	36	3,5	160 000	137 000	2500
2222, 32222, —	110	200	38	3,5	185 000	159 000	2500
2224, 32224, 42224	120	215	40	3,5	209 000	185 000	2500
2226, 32226, 42226	130	230	40	4	217 000	195 000	2000
2228, 32228, 42228	140	250	42	4	254 000	232 000	2000
Средняя узкая серия							
2305, 32305, 42305	25	62	17	2	22 200	14 500	8000
2306, 32306, 42306	30	72	19	2	29 600	20 200	8000
2307, 32307, 42307	35	80	21	2,5	33 400	22 800	6300
2308, 32308, 42308	40	90	23	2,5	40 200	28 000	6300
2309, 32309, 42309	45	100	25	2,5	55 500	40 000	6300
2310, 32310, 42310	50	110	27	3	64 000	46 500	5000
2311, 32311, 42311	55	120	29	3	82 500	61 500	5000
2312, 32312, 42312	60	130	31	3,5	98 000	75 800	4000
2313, 32313, 42313	65	140	33	3,5	103 000	78 000	4000
2314, 32314, 42314	70	150	35	3,5	121 000	95 500	4000
2315, 32315, 42315	75	160	37	3,5	139 000	110 000	3150
2316, 32316, 42316	80	170	39	3,5	147 000	118 500	3150
2317, 32317, 42317	85	180	41	4	175 000	143 000	3150
2318, 32318, 42318	90	190	43	4	190 000	157 000	2500
2319, 32319, 42319	95	200	45	4	206 000	171 500	2500
2320, 32320, 42320	100	215	47	4	238 000	197 000	2500
2322, 32322, 42322	110	240	50	4	301 000	257 000	2000
2324, 32324, 42324	120	260	55	4	380 000	332 000	2000
2326, 32326, 42326	130	280	58	5	424 000	374 000	2000
2328, 32328, 42328	140	300	62	5	469 000	419 000	1600
2332, 32332, 42332	160	340	68	5	541 000	497 000	1600
2336, 32336, 42336	180	380	75	5	764 000	724 000	1250
2340, 32340, 42340	200	420	80	6	860 000	818 000	1250
Средняя широкая серия							
2605, 32605, 42605	25	62	24	2	36 700	27 800	8000
2606, 32606, 42606	30	72	27	2	40 900	30 600	8000
2607, 32607, 42607	35	80	31	2,5	45 800	34 200	6300

продолжение табл. П 5.2

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
2608, 32608, 42608	40	90	33	2,5	59 900	46 600	6300
2609, 32609, 42609	45	100	36	2,5	77 700	61 500	6300
2610, 32610, 42610	50	110	40	3	102 000	85 500	5000
2611, 32611, 42611	55	120	43	3	113 000	92 500	5000
2612, 32612, 42612	60	130	46	3,5	137 000	116 000	4000
2613, 32613, 42613	65	140	48	3,5	149 000	126 000	4000
2615, 32615, 42615	75	160	55	3,5	208 000	183 000	3150
2616, 32616, 42616	80	170	58	3,5	220 000	198 000	3150
2617, 32617, 42617	85	180	60	4	254 000	230 000	3150
2618, 32618, 42618	90	190	64	4	265 000	240 000	2500
2620, 32620, 42620	100	215	73	4	356 000	336 000	2500
2622, 32622, 42622	110	240	80	4	364 000	450 000	2000
2624, 32624, 42624	120	260	86	4	548 000	535 000	2000
2626, 32626, 42626	130	280	93	5	650 000	650 000	2000
2630, 32630, 42630	150	320	108	5	753 000	757 000	1600
2634, 32634, 42634	170	360	120	5	1040 000	1080 000	1250
Тяжелая серия							
— , 32410, 42410	50	130	31	3,5	100 000	75 000	4000
2411, 32411, 42411	55	140	33	3,5	108 000	82 000	4000
2412, 32412, 42412	60	150	35	3,5	121 000	101 000	4000
2413, 32413, 42413	65	160	37	4	143 000	112 000	3150
2414, 32414,	70	180	42	4	183 000	147 000	3150
2415, 32415, 42415	75	190	45	4	212 000	173 000	3150
2416, 32416, —	80	200	48	5	244 000	200 000	2500
2417, 32417, 42417	85	210	52	5	266 000	221 000	2500
2418, 32418, 42418	90	225	54	5	300 000	252 000	2500
— , 32419, —	95	240	55	5	320 000	273 000	2500
2420, 32420, 42420	100	250	58	5	360 000	310 000	2000
2421, 32421, 42421	105	260	60	5	400 000	345 000	2000
2422, 32422, 42422	110	280	65	5	445 000	388 000	2000
2424, 32424, 42424	120	310	72	6	557 000	500 000	2000
— , 32426, 42426	130	340	78	6	670 000	605 000	1250
— , 32428, 42428	140	360	82	6	725 000	655 000	1250

П.5.3. Подшипники шариковые радиальные однорядные с двумя уплотнениями

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*,мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*,об/мин
180500	10	30	14	1	4590	2670	8000
180501	12	32	14	1	4690	2670	8000
180502	15	35	14	1	5220	3030	6300
180503	17	40	16	1	7360	4410	6300
180504	20	47	18	1,5	8220	5000	5000
180505	25	52	18	1,5	10 800	6950	4000
180506	30	62	20	1,5	11 600	7740	4000
180508	40	80	23	2	23 200	17 750	3150
180509	45	85	23	2	24 100	17 850	3150
180602	15	42	17	1,5	8750	5410	8000
180603	17	47	19	1,5	10 700	6680	8000

Приложение 6.

П6.1. **Высоты оси вращения и связанные с ними установочные размеры, мм, электрических машин (см. рис. 1.2)**

h		b_{10}	Условное обозначение длины сердечника	l_{10}	l_{31}	d_{10}
Номинальное значение	Допуск					
1	2	3	4	5	6	7
Высоты оси вращения от 56 до 400 мм						
56	-0,5	90	—	71	36	5,8
63	-0,5	100	—	80	40	7
71	-0,5	112	—	90	45	7
80	-0,5	125	—	100	50	10
90	-0,5	140	S L	100 125	56	10
100	-0,5	160	S L	112 140	63	12
112	-0,5	190	S M L	114 140 159	70	12
132	-0,5	216	S M L	140 178 203	89	12
160	-0,5	254	S M L	178 210 254	108	15
180	-0,5	279	S M L	203 241 279	121	15
200	-0,5	318	S M L	228 267 305	133	19
225	-0,5	356	S M L	286 311 356	149	19
250	-0,5	404	S M L	311 349 406	168	24
280	-1	457	S M L	368 419 457	190	24

продолжение табл. П 6.1

1	2	3	4	5	6	7
315	-1	508	S M L	406 457 508	216	28
355	-1	610	S M L	500 560 630	254	28
400	-1	686	S M L — —	560 630 710 800 900	280	35
Высоты оси вращения от 450 до 630 мм						
450	-1	710 800 900 1000 1120	—	355 400 450 500 560 630 710 800 900 1120 1250	—	35
500	-1	800 900 1000 1120 1250	—	400 450 500 630 710 800 900 1000 1120 1250 1400	—	42

продолжение табл. П 6.1

1	2	3	4	5	6	7
560	-1	900 1000 1120 1250 1400	—	450 500 560 630 710 800 900 1000 1120 1250 1400	—	42
630	-1	1000 1120 1250 1400 1600	—	500 560 630 710 800 900 1000 1120 1250 1400 1600	—	48

Примечание. Для двигателей с высотами оси вращения от 450 до 630 мм размеры l_{31} следует выбирать из ряда 100, 200, 224, 250, 280, 315, 335, 355, 375, 400, 425, 450, 475, 500, 530, 560, 600, 630, 670, 710, 750, 800, 900, 1000 мм независимо от высоты вращения.

Приложение 7.

Требования к оформлению курсового проекта

По структуре курсовой проект состоит из графической части и расчетно - пояснительной записки (далее - РПЗ).

Графическая часть выполняется на белой чертежной бумаге формата А1 (594 × 841). Оформление графической части производится согласно требованиям стандартов ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ (ЕСКД).

Сборочный чертеж должен сопровождаться спецификацией.

Спецификацию к чертежам следует составлять на отдельном листе чертежной бумаги формата А4 или если позволяет место непосредственно на листе графической части над штампом.

Разделы спецификации должны разделяться заголовками, сверху и снизу которых оставляется свободная строчка. Заголовки подчеркиваются тонкой линией. В графе первой "формат" указываются форматы, на которых выполнены чертежи. Графу "зона" в курсовом проекте можно не заполнять. Графу "поз." заполняют порядковым номером детали, обозначенной на чертеже. Если таковой отсутствует, то графу оставляют пустой.

В графе "обозначение" проставляют номера конструкторских документов, выполненных в проекте. Если документ не в проекте, графа остается свободной.

В графе "количество" проставляется количество одинаковых изделий, входящих в сборочную единицу.

В примечании указываются пояснения к графам, исключения, дополнения.

Графическую часть допускается выполнять карандашом, черной тушью или с использованием графических редакторов и систем проектирования.

РПЗ выполненняется шрифтом Times New Roman, размер 14, междустрочный интервал – 1.0. Каждый лист РПЗ должен иметь рамку и штамп в соответствии с ЕСКД.

Содержание РПЗ дипломной работы:

- титульный лист;
- задание на курсовое проектирование;
- спецификация к проекту;
- содержание;
- техническое задание;
- расчетная часть;
- список литературы;
- приложения, спецификация к чертежам (при необходимости).

Титульный лист (П.7.1) является первой страницей курсового проекта. Его включают в общую нумерацию страниц РПЗ. Номер страницы на титульном листе не проставляют. Рамка и штамп на титульном листе отсутствуют.

Задание для курсового проекта выдается на специальных бланках (П.7.2). Его включают в общую нумерацию страниц РПЗ. Номер страниц на бланках дипломного задания не проставляется.

Техническая ведомость к курсовому проекту выполняется на специальном бланке (П.7.3). Номера страниц начинают печатать с листа технической ведомости.

В содержании (П.7.4) последовательно перечисляются заголовки курсовой работы: заголовки разделов, подразделов, список использованных источников и приложения с указанием номера страницы, на которой помещен каждый заголовок.

Все заголовки в содержании записывают строчными буквами (первая — прописная).

Номер страницы проставляют справа на одном уровне арабской цифрой без буквы "с" и знаков препинания.

Слово "содержание" записывают в виде заголовка (симметрично тексту) прописными буквами.

Список литературы (П.7.5): приводится библиографический перечень учебной, справочной, специальной технической литературы, а также публикации и электронные ресурсы.

Критерии оценки качества выполнения курсовых проектов:

В критерии оценки входит:

- соответствие выполненного проекта заданию;
- качество выполнения графической части;
- уровень знаний и умений, позволяющий реализовать поставленные профессиональные задачи;
- обоснованность, четкость, грамотность, лаконичность изложения ответов на вопросы при защите курсового проекта;

Департамент внутренней и кадровой политики
Белгородской области
ОГАПОУ «Губкинский горно-политехнический колледж»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

Проектирование электрических машин постоянного тока

ГГПК. О. 13.02.11. 07.00.ПЗ

Руководитель: Л.В. Канова
Разработал: И.С. Ковалев

2016

ЗАДАНИЕ

Для курсового проектирования по МДК.01.01 Электрические машины и аппараты

Студенту ___ курса группы _____ ОГАПОУ «Губкинский горнополитехнический колледж» _____

Тема Проектирования электрических машин постоянного тока

Вариант _____

Курсовой проект на указанную тему выполняется в следующем объем:

I. Пояснительная записка
1. Выбор технического задания
2. Выбор главных размеров
3. Выбор обмотки якоря
4. Расчет геометрии зубцовой зоны
5. Расчет обмотки якоря
6. Определение размеров магнитной цепи
7. Расчетные сечения магнитной цепи
8. Средние длины магнитных линий
9. Индукция в расчетных сечениях магнитной цепи
10. Магнитные напряжения отдельных участков магнитной цепи
11. Расчет параллельной обмотки возбуждения
12. Коллектор и щетки
13. Коммутационные параметры
14. Расчет обмотки добавочных полюсов
15. Потери и КПД
16. Тепловой расчет
17. Вентиляционный расчет
18. Элементы конструкции
19. Список литературы
20. Приложения:

П-1: Спецификация к графической части

II. Графическая часть

Лист Ф А1 с изображением сборочного чертежа проектируемого двигателя.

Дата выдачи _____ 2015 года

Срок окончания _____ 2016 года

Руководитель курсового проектирования _____ Л.В. Канова

№ строки	Формат	Обозначение	Наименование	Колич. листов	№ экз	Примечание
			Документация			
			Задание			
1	А4	ГГПК КП. 13.02.11. 07.00. ПЗ	Пояснительная записка	36		
2	А1	ГГПК КП. 13.02.11. 07. 01. СБ	Сборочный чертеж двигателя	1		

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	ГГПК КП. 13.02.11.07.00.ТП			
Разработал		Ковалев И.С.			Проектирование электрических машин постоянного тока	Лит.	Лист 3	Листов 36
Руководит.		Канова Л.В.					гр.Э-12	

Содержание:

13. Выбор технического задания 4
14. Выбор главных размеров 5
15. Выбор обмотки якоря 7
16. Расчет геометрии зубцовой зоны 9
17. Расчет обмотки якоря 10
18. Определение размеров магнитной цепи 11
19. Расчетные сечения магнитной цепи 11
20. Средние длины магнитных линий 12
21. Индукция в расчетных сечениях магнитной цепи 12
22. Магнитные напряжения отдельных участков магнитной цепи 13
23. Расчет параллельной обмотки возбуждения 18
24. Коллектор и щетки 20
25. Коммутационные параметры 21
26. Расчет обмотки добавочных полюсов 22
27. Потери и КПД 24
28. Тепловой расчет 27
29. Вентиляционный расчет 30
30. Элементы конструкции 31

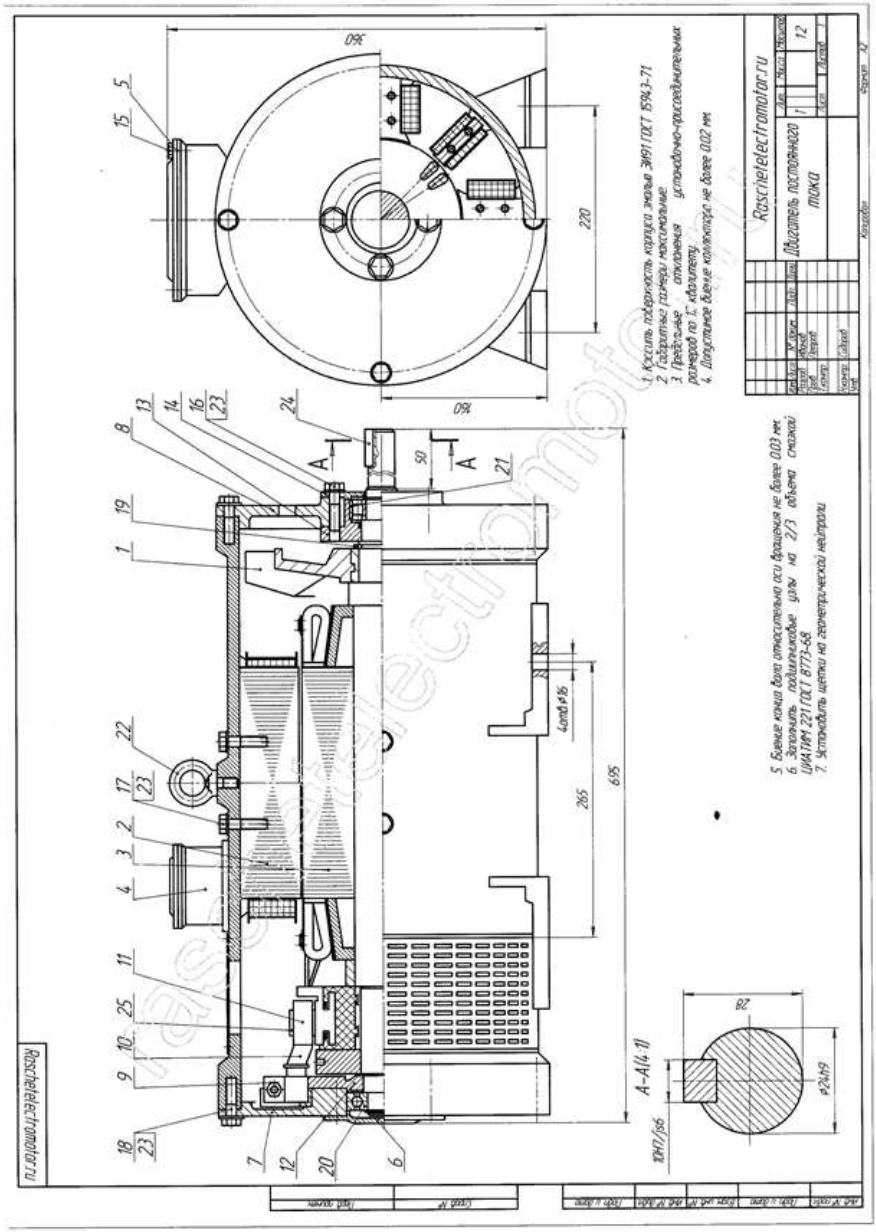
Список литературы 36

Список литературы

1. Боголюбов, С.К. Черчение и деталирование сборочных чертежей, альбом.- М.: Машиностроение, 1996.
2. Канова, Л.В. Проектирование электрических машин постоянного тока (методические рекомендации), 2015.
3. Кацман, М.М. Электрические машины: Учеб.для студентов сред.проф.учебных заведений. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа; Издательский центр «Академия», 2008 – 463с.
4. Копылов, И.П., Проектирование электрических машин, М.: Высшая школа, 2002.
5. Чекмарев, А.А. Справочник по машиностроительной графике. – М.: Высшая школа, 1994.

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Приме-чание

П.7.7.


Raschelelectromotor.ru
Двигатель постоянного тока
1. Классить подрезность корпуса якоря 3кл11 ГОСТ 8593-71
2. Габаритные размеры максимальные
3. Предельные отклонения установочно-присоединительных размеров по 1с квалитету
4. Допустимое биение коллектора не более 0,02 мм
5. Биение конца вала относительно оси вращения не более 0,03 мм
6. Заполнить подшипниковые узлы на 2/3 объема смазкой ШАТИМ 221 ГОСТ 8773-68
7. Установить щетки на геометрическую нейтраль
A–A(4:1)
ø24h9
82
360
220
695
265
4отв.ø16
50
1Кл11/1б6

Список использованных источников

1. Беляев, Е.Ф. Расчет и проектирование электрических машин постоянного тока малой мощности: Учебно-метод. пособие по курсовому проектированию / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2000. 72 с.
2. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа; Логос, 2000. – 607 с.
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
4. Вольдек А. И. Электрические машины: Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
5. Кацман, М.М. Электрические машины: Учеб.для студентов сред.проф.учебных заведений. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа; Издательский центр «Академия», 2008 – 463с.
6. Копылов, И.П., Проектирование электрических машин, М.: Высшая школа, 2002.
7. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Часть 1, 2. – Л.: Энергия, 1972 - 1973.- 544, 648 с.
8. Сипайлов Г. А., Кононенко Е. В., Хорьков К. А. Электрические машины (специальный курс). – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.
9. Кононенко Е. В., Королев Н. И., Махначев П. П. электрические машины. Вопросы для программного обучения. Учебное пособие. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1996. – 192 с.
10. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К.Клоков и др.; Под ред. И.П.Копылова. М.:Высшая школа, 1980.
11. Токарев Б. Ф. Электрические машины: Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
12. Хвостов В. С. Электрические машины. Машины постоянного тока: Учебник для вузов / Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1988. – 336 с.
13. Сергеенков Б. Н., Киселев В. М., Акимова Н. А. Электрические машины. Трансформаторы: Учебное пособие для вузов / Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1989. – 352 с.
14. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов / Под ред. И.П. Копылова. - М.: Энергия, 1980. – 469 с.
15. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общей ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 1989. – 456 - 688 с.
16. Справочник электрика. – 4-е изд., исправл. и доп. – М.: ИП РадиоСофт, 2010. – 512с.: ил.