

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»**

А.М. КУТАРЁВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рекомендовано Учёным советом Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования - «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия по программе высшего профессионального образования по специальности 140601 «Электромеханика» направления подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»

Оренбург 2006

УДК 621.313.333 (075.8)
ББК 31.261.2 я 73
К-95

Рецензенты

доктор технических наук, профессор Н.Г. Никиян
кандидат технических наук, доцент А.П. Редкоп

Кутарев А.М.

К-95 **Проектирование двигателей постоянного тока параллельного
возбуждения: учебное пособие/А.М. Кутарёв – Оренбург : ГОУ
ОГУ, 2006.– 159 с.**

ISBN – 5-7410-1245-9

В пособии представлена методика электромагнитных, тепловых и вентиляционных расчетов двигателей постоянного тока. Содержание соответствует программе курса «Инженерное проектирование и системы автоматизированного проектирования электрических машин».

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения специальности 140601 – Электромеханика.

ББК 31.261 я 7

К $\frac{2202070100}{6Л9 - 06}$

ISBN- 5-7410-1245-9

© Кутарев А.М., 2006
© ГОУ ОГУ, 2006

Содержание

	Введение.....	5
1	Общие вопросы.....	7
1.1	Серии машин постоянного тока.....	7
1.2	Исполнения двигателей постоянного тока.....	9
1.3	Регулирование частоты вращения в двигателях постоянного тока.....	13
1.4	Коммутация машин постоянного тока.....	13
1.5	Якорные обмотки машин постоянного тока.....	14
1.6	Компенсационная обмотка.....	22
2	Главные размеры и электромагнитные нагрузки.....	24
3	Расчёт размеров зоны зубцов и обмотки якоря.....	34
3.1	Изоляция обмоток якорей машин постоянного тока.....	34
3.2	Расчет размеров овальных пазов и обмотки якоря.....	37
3.3	Расчет размеров прямоугольных пазов и обмотки якоря	45
4	Выбор воздушного зазора	48
5	Определение размеров полюсов и станины.....	50
6	Расчёт магнитной цепи.....	52
7	Проектирование обмоток возбуждения.....	60
7.1	Определение МДС обмотки возбуждения в режиме номинальной нагрузки.....	60
7.2	Определение размагничивающего действия поперечного поля якоря	61
7.3	Проектирование стабилизирующей обмотки.....	63
7.4	Расчёт обмотки параллельного возбуждения.....	65
8	Расчёт коммутации.....	70
9	Коллектор и щётки.....	71
10	Расчёт добавочных полюсов.....	74
11	Размещение обмоток возбуждения и добавочных полюсов.....	84
12	Расчёт потерь мощности в двигателе постоянного тока.....	87
12.1	Расчёт потерь холостого хода.....	87
12.2	Определение номинальных токов двигателя.....	89
13	Расчёт рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.....	91
14	Тепловой и вентиляционный расчёт двигателя.....	94
15	Требования к оформлению пояснительной записки.....	108
16	Подготовка к защите курсового проекта.....	110
	Список использованных источников.....	113
	Приложение А Технические данные двигателей постоянного тока..	114
	Приложение Б Обмоточный провод круглого поперечного сечения	123
	Приложение В Обмоточный провод прямоугольного поперечного сечения.....	125
	Приложение Г Основные кривые намагничивания сталей.....	134
	Приложение Д Подшипники качения.....	144
	Приложение Е Щётки для электрических машин.....	149

Приложение Ж Упругие втулочно-пальцевые муфты	153
Приложение И Клиноремённые шкивы	155
Приложение К Титульный лист пояснительной записки	157
Приложение Л Пример оформления листа “Техническое задание”..	158
Приложение М Пример оформления аннотации.....	159

Введение

Машины постоянного тока общего назначения выпускают серийно. Каждая новая серия выпускается, примерно, через десять лет. При разработке новой серии учитываются требования международных стандартов и рекомендаций международной электротехнической комиссии, современный уровень развития производства, достижения в области теории проектирования электрических машин и технологии их производства, тенденции в развитии электромашиностроения, прогноз изменения показателей технического уровня, потребности в машинах постоянного тока на рынке сбыта и т.д. Конструкция машин должна быть технологичной и допускать максимальную автоматизацию производства. Особую группу требований составляют экономические показатели, смысл которых сводится к тому, что машины новой серии должны быть экономичными как в производстве, так и в эксплуатации.

Двигатели постоянного тока обладают большой глубиной регулирования частоты вращения и сохраняют во всём диапазоне регулирования высокий коэффициент полезного действия. Несмотря на то, что при традиционной конструкции они в 2 – 3 раза дороже асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором их применяют во всех тех случаях, когда их свойства имеют решающее значение. Двигатели постоянного тока находят применение в металлообрабатывающих станках, с их помощью приводятся в действие прокатные станы (слябинги и блюминги). Крановые двигатели находят применение в приводах различных подъёмных механизмов. Двигатели постоянного тока широко используются в электрической тяге, например, на магистральных электровозах, в качестве рабочих двигателей на тепловозах, на пригородных электропоездах, в метрополитенах, на трамваях, троллейбусах и т.д. Двигатели постоянного тока используют для привода во вращение гребных винтов на морских судах. Они используются в автомобилях, тракторах, самолётах и других летательных аппаратах, где имеется питание на постоянном токе.

На базе машин постоянного тока основного исполнения выпускается широкий спектр конструктивных и электрических модификаций, к числу которых относятся и генераторы постоянного тока. Долгие годы генераторы постоянного тока широко использовались как источники постоянного тока. В связи с быстрым развитием и широким внедрением в промышленность тиристорных преобразователей стала отпадать потребность в применении генераторов постоянного тока как источников электрической энергии постоянного тока. В то же время широкое применение в регулируемом электроприводе силовых полупроводниковых преобразователей и современных систем управления повлекло за собой значительный рост производства двигателей постоянного тока. По данным ведущих электромашиностроительных фирм Западной Европы, США, Японии, потребность в двигателях малой и средней мощности удваивается каждые 5-7 лет [3].

В учебном пособии представлена методика учебного проектирования двигателей постоянного тока параллельного возбуждения общего назначения с высотой оси вращения до 315 мм включительно.

Пособие содержит данные, необходимые для выполнения электромагнитного, теплового и вентиляционного расчёта двигателей постоянного тока. Даны рекомендации к оформлению пояснительной записки. В то же время, работа над учебным проектом предполагает работу с дополнительной литературой, список которой приводится в конце пособия, и использование альбомов и каталогов чертежей двигателей постоянного тока.

1 Общие вопросы

1.1 Серии машин постоянного тока

Первая общесоюзная серия машин постоянного тока была разработана в 1954 – 1956 годах. Она получила название серии *П*. Машины этой серии заменили разработанные ещё в 1932 году первые серии машин постоянного тока, которые к началу пятидесятых годов уже не отвечали требованиям производства и эксплуатации.

При разработке серии *П* машин постоянного тока впервые была применена твёрдая шкала мощностей с фиксированным значением номинальных частот вращения. На базе машин основного исполнения была создана широкая номенклатура электрических и конструктивных модификаций с высоким уровнем унификации деталей и сборочных единиц.

В основу построения серии был принят габарит машины. Габарит определяется внешним диаметром якоря. Для каждого габарита установлены две длины сердечника.

Условное обозначение машин серии *П* имело следующую структуру:

$$\frac{П}{1} \frac{Х}{2} \frac{Х}{3} \frac{Х}{4} \frac{Х}{5},$$

где 1 - *П* - название серии;

2 – исполнение по способу охлаждения. В этой позиции может располагаться буква, которая обозначает:

Б - машина имеет закрытое исполнение с естественным охлаждением;

Р - машина имеет закрытое исполнение с воздухоохладителем, пристроенным наверху машины. В обозначении машин защищённого исполнения буква отсутствует;

3 – условный габарит машины;

4 – условная длина сердечника якоря (1 или 2);

5 – климатическое исполнение и категория размещения.

Машины серии *П* сняты с производства и в новых разработках не применяются.

Серия *2П* машин постоянного тока спроектирована к 1974 году в полном соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК). Серия охватывает высоты оси вращения от 90 мм до 315 мм и диапазон мощностей от 0,37 кВт до 200 кВт. Машины этой серии предназначены для работы в широко регулируемых приводах.

В машинах серии *2П*, по сравнению с машинами предыдущих серий, повышена перегрузочная способность, расширен диапазон регулирования частоты вращения, повышена мощность на единицу массы, улучшены динамические свойства, уменьшены шум и вибрации, увеличена надёжность и ресурс работы.

В основу построения серии $2П$ машин постоянного тока был положен не габарит, а высота оси вращения.

Структура условного обозначения машин постоянного тока серии $2П$:

$$\frac{2П}{1} \frac{X}{2} \frac{X}{3} \frac{X}{4} \frac{X}{5} \frac{X}{6},$$

где 1 - название серии: вторая серия машин постоянного тока;

2 – исполнение по способу защиты и вентиляции: H - защищённое с самовентиляцией, Φ - защищённое с независимой вентиляцией от постороннего вентилятора, B - закрытое с естественным охлаждением, O - закрытое с внешним обдувом от постороннего вентилятора;

3 – высота оси вращения, мм;

4 – условное обозначение длины сердечника якоря: M - средняя, L - большая;

5 – буква Γ при наличии встроенного тахогенератора (в двигателях без тахогенератора – опускается);

6 – климатическое исполнение и категория размещения (регламентируются ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70).

Двигатели постоянного тока серии $2П$ предназначены для работы от сети постоянного тока или от тиристорных преобразователей. Номинальное напряжение якорной цепи 110, 220, 440 и 660 Вольт. В машинах с независимым возбуждением напряжение источника питания обмотки возбуждения составляет 110 В или 220 В.

Двигатели с высотой оси вращения $h = 90$ мм и 100 мм выполняются с двумя главными полюсами, а при большей высоте оси вращения ($h = 112$ мм – 315 мм) - с четырьмя полюсами. Двигатели серии $2П$ выполняются с полным числом добавочных полюсов.

Курс на широкую автоматизацию промышленного производства в начале восьмидесятых годов прошедшего столетия, способствовал быстрому развитию и увеличению выпуска широко регулируемых тиристорных приводов на основе двигателей постоянного тока. Использование двигателей постоянного тока в станках с числовым программным управлением в приводах главного движения потребовало повысить в три – четыре раза мощность при заданной частоте вращения, расширить в два – два с половиной раза диапазон регулирования частоты вращения и улучшить динамические и акустические свойства двигателей.

Одновременно с требованием увеличения выпуска двигателей постоянного тока стала более актуальной проблема замены ручного труда при их производстве на современную машинную технологию за счёт оснащения заводов высокопроизводительным технологическим оборудованием.

Работы по созданию новой серии машин постоянного тока были начаты в конце семидесятых годов. К 1984 году эти работы были завершены. Новая серия машин постоянного тока получила название серия $4П$.

Двигатели постоянного тока серии *4П* унифицированы с асинхронными двигателями серии *4А* по исполнению элементов конструкции, исполнению статора и технологии их производства. Особенность унифицированной конструкции, по сравнению с традиционной конструкцией машин постоянного тока, заключается в следующем:

- магнитопровод статора выполняется шихтованным из листовой электротехнической стали. Это практически исключает запаздывание во времени изменения магнитного потока добавочных полюсов при изменении тока цепи якоря, что благоприятно сказывается на коммутации;
- статор неявнополюсный. Обмотки статора располагаются в пазах, равномерно распределённых по окружности внутренней поверхности, благодаря чему улучшается теплоотдача и плотности тока в обмотках возбуждения, добавочных полюсов и компенсационной обмотке могут быть увеличены до значений плотности тока в обмотке статора, характерных для асинхронных двигателей. Повышен класс нагревостойкости используемых изоляционных материалов;
- компенсационная обмотка, распределённая по всем пазам, полностью компенсирует поперечное поле якоря;
- повышена степень защиты двигателей, что повышает их надёжность при эксплуатации.

Двигатели серии *4П* используются в комплексном тиристорном электроприводе в станкостроении, железнодорожном и морском транспорте, для приводов главного движения станков с ЧПУ, гибких производственных систем и роботизированных комплексов и т.д.

1.2 Исполнения двигателей постоянного тока

Классификация конструктивных исполнений электрических машин дана в публикации МЭК 34-7 и в ГОСТ 2479-79. Согласно этим документам обозначение конструктивного исполнения машин состоит из букв *IM* - начальные буквы английских слов International, Mounting (международное обозначение исполнения по способу монтажа) и следующих за ними цифр. Первая цифра обозначает группу конструктивного исполнения. Вторая и третья цифры обозначают способ монтажа. Четвёртая (последняя) цифра обозначает исполнение выступающего конца вала.

Формы исполнения двигателей серии *2П* в зависимости от высоты оси вращения представлены в таблице 1.1.

Исполнение электрических машин по степени защищённости регламентируется ГОСТ 14254-96. Согласно стандарту обозначение степени защищённости состоит из букв *IP* - начальные буквы английских слов International, Protection (международное обозначение степени защищённости) и следующих за ними двух цифр.

Таблица 1.1 - Формы исполнения двигателей серии 2П

Форма исполнения	Высота оси вращения
<i>IM1001, IM1011, IM1031</i>	112, 132, 160, 180, 200
<i>IM2101, IM2111, IM2131</i>	180, 200
<i>IM3601, IM3611, IM3631</i>	112, 132, 160, 180, 200

Первая цифра (от 0 до 6) характеризует защищённость машины от попадания внутрь посторонних предметов и защиту обслуживающего персонала от возможного соприкосновения с вращающимися и токоведущими частями, находящимися внутри машины. Например, цифра 2 обозначает защищённость машины от проникновения внутрь посторонних предметов диаметром свыше 12 мм и защиту от возможного соприкосновения пальцев с токоведущими и вращающимися частями внутри машины. Цифра 4 обозначает защищённость от проникновения внутрь машины предметов диаметром более 1 мм и т.д.

Вторая цифра (от 0 до 8) характеризует защищённость машины от попадания воды. Например, цифра 2 обозначает защищённость машины от капель воды, падающих под углом до 15^0 к вертикали. Цифра 3 – от капель воды, падающих под углом до 60^0 к вертикали, а цифра 4 – защита от брызг воды любого направления и т.д.

Обозначение способов охлаждения регламентируется ГОСТ 20459-87. Согласно стандарту обозначение способов охлаждения состоит из букв IC – начальные буквы слов International, Cooling (международное обозначение способов охлаждения) и следующих за ними буквой и парой цифр. Буква обозначает вид хладагента. Если для охлаждения машины используется воздух, то буква опускается.

Первая цифра (от 0 до 8) характеризует исполнение вентиляционного тракта. Например, цифра 0 обозначает свободную циркуляцию. Цифра 4 – охлаждение с помощью наружной поверхности.

Вторая цифра (от 0 до 8) характеризует способ передвижения хладагента. Например, цифра 0 обозначает свободную конвекцию, а цифра 1 - самовентиляцию. Если машина имеет две или более цепей охлаждения, то в обозначении указывают характеристики всех цепей охлаждения, начиная с характеристики цепи с вторичным хладагентом.

Виды защиты от воздействия окружающей среды и способы охлаждения двигателей постоянного тока серии 2П приведены в таблице 1.2.

Двигатели постоянного тока серии 4П имеют следующие типы исполнения по степени защиты и способу охлаждения:

а) закрытое исполнение со степенью защищённости IP44 и способом охлаждения IC0041 (без вентиляции) или IC0141, с поверхностным охлаждением посредством вентилятора, расположенного на валу двигателя;

б) защищённое исполнение со степенью защищённости IP23, с охлаждением от автономного вентилятора, устанавливаемого сверху (сбоку), - IC06, или по оси двигателя - IC05.

Таблица 1.2 - Виды защиты от воздействия окружающей среды и способы охлаждения двигателей постоянного тока серии 2П

Типоразмер двигателя	Степень защиты от воздействия окружающей среды	Способ охлаждения
2ПН, 2ПНГ ($h = 90...315$)	IP22	IC01
2ПФ, 2ПФГ ($h = 132...315$)	IP22	IC06 IC05
2ПБ, 2ПБГ ($h = 90...200$)	IP44	IC0040
2ПО, 2ПОГ ($h = 132...200$)	IP44	IC0541

В серии 2П десять конструктивных модификаций двигателей:

- 2ПН - защищённые с самовентиляцией (IP23, IC01);
- 2ПНК - защищённые с самовентиляцией и двумя рабочими концами вала;
- 2ПНГ - защищённые с самовентиляцией и встроенным тахогенератором;
- 2ПФ - защищённые с независимой вентиляцией (IP23, IC05);
- 2ПФГ - защищённые с независимой вентиляцией и тахогенератором;
- 2ПБ - закрытые (IP44, IC0041);
- 2ПБК - закрытые с двумя рабочими концами вала;
- 2ПБГ - закрытые с тахогенератором;
- 2ПО - закрытые обдуваемые с независимой вентиляцией (IP44, IC0541);
- 2ПОГ - закрытые обдуваемые с независимой вентиляцией и встроенным тахогенератором.

Структура серии 4П двигателей постоянного тока представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - 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 3,5 4,7	IC0141	IP44
		100	5,6 7,1 9,5		
		112	14 19		
		132	25 35		
		160	47		
Закрытые с естественным охлаждением	4ПБ	80	1,2 1,6 2,4	IC0041	IP44
		100	3,5 4,7 5,6		
		112	7,1 9,5		
	4ПБ	132	14 19	IC0041	
		160	25 35		
Широко регулируемые с принудительной вентиляцией	4ПФ	112	53 71	IC06 IC05	IP23
		132	95 118 140		
		160	190 236 280		
		180	355 475		
		200	560 710		
		225	850 1000		

Продолжение таблицы 1.3 - Структура двигателей серии 4П

Исполнение	Тип	Высота оси вращения, мм	Номинальный вращающий момент, Н·м	Способ охлаждения	Степень защиты
Широко регулируемые с принудительной вентиляцией	4ПФ	250	1250	IC06	IP23
			1500		
		280	1700 2120		
Крупные двигатели для тяжёлых условий эксплуатации		355	3000 3750 4750		IP23
		450	6000		
			9500 15000		

1.3 Регулирование частоты вращения в двигателях постоянного тока

Регулирование частоты вращения в двигателях постоянного тока вверх от номинальной осуществляется ослаблением поля главных полюсов машины. При таком способе регулирования частоты вращения мощность остаётся постоянной. Если при увеличении частоты вращения выше некоторого значения коммутация ухудшается, то мощность, начиная с этой частоты, должна быть ниже номинальной.

Регулирование частоты вращения вниз от номинальной производится понижением напряжения на якоре. При таком способе регулирования частоты вращения момент двигателя остаётся постоянным. В тех случаях, когда с уменьшением частоты вращения условия охлаждения ухудшаются (двигатели с самовентиляцией), нагрузочный момент двигателя при продолжительном режиме работы на пониженной частоте вращения должен уменьшаться.

В двигателях постоянного тока серии 2П с высотой оси вращения до 315 мм (двигатели без компенсационной обмотки) диапазон регулирования частоты вращения вверх от номинальной не превышает 1 : 2, а при высоте оси вращения свыше 315 мм (двигатели с компенсационной обмоткой) - достигает 1 : 5.

В двигателях постоянного тока серии 4П диапазон регулирования частоты вращения увеличен в 2 – 2,5 раза.

1.4 Коммутация машин постоянного тока

Коммутация в машине постоянного тока – это процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую, который сопровождается изменением направления тока в коммутируемой секции на противоположное. Ком-

мутация сопровождается искрением на коллекторе. Искрение на коллекторе может приводить к разрушению поверхности коллектора и к ещё большему искрению.

Переключение секции из одной параллельной ветви в другую сопровождается изменением тока в коммутируемой секции. Это изменение тока вызывает появление в секции ЭДС самоиндукции. Щётка перекрывает несколько коллекторных пластин и одновременно коммутирует несколько секций. В пазу якоря машин постоянного тока в слое по ширине паза размещаются несколько секционных сторон. Следовательно, в коммутируемой секции кроме ЭДС самоиндукции индуцируется ЭДС взаимной индукции. Сумму этих ЭДС называют реактивной ЭДС. Реактивная ЭДС, индуцируемая в коммутируемой секции, задерживает изменение тока в секции. Кроме реактивной ЭДС в коммутируемой секции индуцируется ЭДС вращения от движения секции в поперечном поле якоря. ЭДС вращения действует аналогично реактивной ЭДС. Если в машине постоянного тока не предпринимаются специальные мероприятия, то коммутация носит замедленный характер.

С целью улучшения коммутации в машинах постоянного тока, кроме микромашин, выполняют добавочные полюсы. Добавочные полюсы располагают между главными полюсами (по поперечной оси машины). МДС обмоток добавочных полюсов компенсирует поперечное поле якоря в зоне коммутации и создаёт магнитное поле при движении в котором в коммутируемой секции индуцируется ЭДС коммутации, которая направлена встречено по отношению к реактивной ЭДС и даже несколько превышает её. Добавочные полюсы позволяют приблизить коммутацию к линейной коммутации, и даже придать ей несколько ускоренный характер.

Коммутация в машине постоянного тока оценивается по степени искрения под сбегающим краем щётки классом коммутации по шкале, приведённой в ГОСТ 183-74.

1.5 Якорные обмотки машин постоянного тока

По схеме соединения проводников и направлению отгиба лобовых частей обмотки якоря машин постоянного тока разделяются на простые петлевые, простые волновые, сложные петлевые и волновые и комбинированные (или лягушачьи).

В простых петлевых обмотках начала и концы секций присоединяются к соседним коллекторным пластинам, а в сложных петлевых – через m коллекторных пластин (где m - число ходов обмотки).

В простых волновых обмотках начала и концы секций присоединяются к коллекторным пластинам, отстоящим друг от друга на величину шага по коллектору. После завершения полного обхода по коллектору конец последней секции соединяется с коллекторной пластиной, отстоящей от первой на одно коллекторное деление, а в сложных – на m коллекторных пластин.

Лягушачьи обмотки – это комбинация петлевой и волновой обмотки.

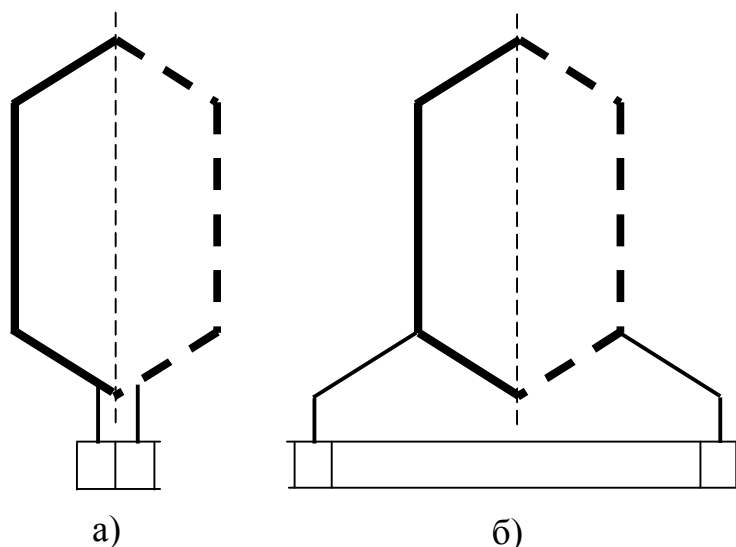


Рисунок 1.1 - Секция петлевой (а) и волновой (б) обмотки

Петлевые и волновые обмотки выполняются двухслойными, а лягушечьи обмотки – четырёхслойными.

Если N - число эффективных проводников обмотки якоря, а w_s - число витков в секции, то число секций S

$$S = \frac{N}{2 \cdot w_s}. \quad (1.1)$$

Число коллекторных пластин $K = S$.

В лягушачьих обмотках к коллекторной пластине присоединяются концы четырёх секций.

С целью улучшения использования зубцовой зоны в машинах постоянного тока в паз, в одном слое, укладывают несколько (u_n) секционных сторон. Таким образом, считают, что в одном реальном пазу находится u_n элементарных (величина u_n - это число секционных сторон по ширине паза в одном слое).

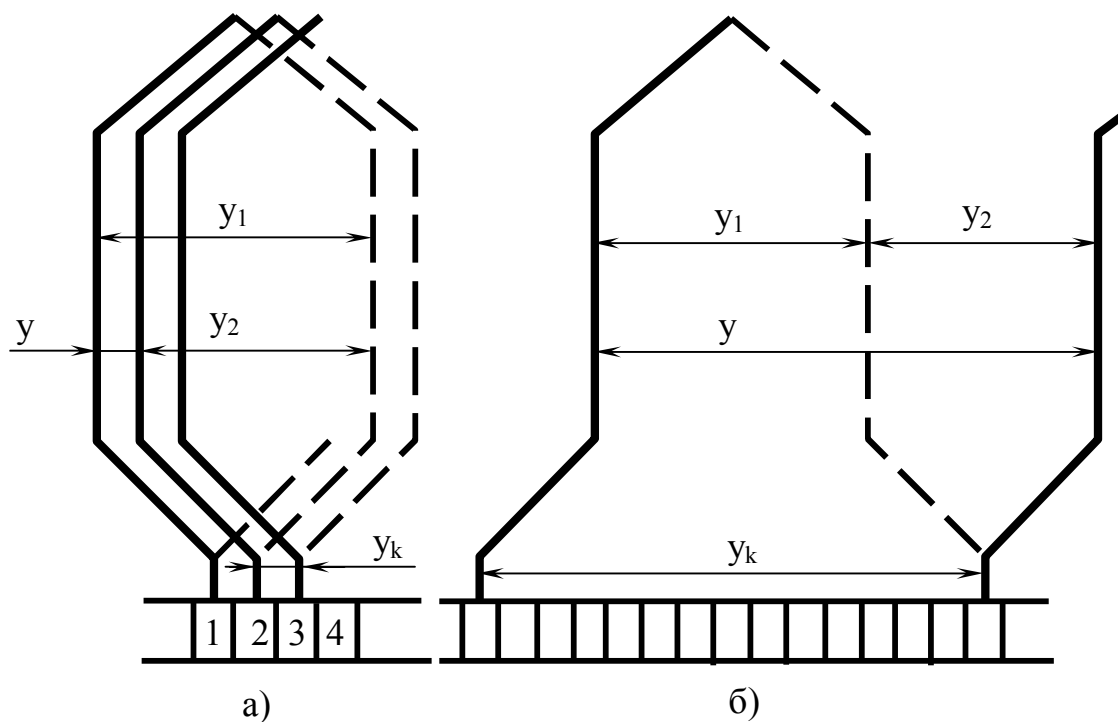
Число элементарных пазов якоря

$$z_9 = z_2 \cdot u_n = S = K, \quad (1.2)$$

где z_2 – число реальных пазов якоря.

Исполнение якорных обмоток характеризуется первым частичным шагом (y_1), вторым частичным шагом (y_2) и результирующим шагом (y). Первый частичный шаг – расстояние в элементарных (реальных) пазах между начальной и конечной стороной секции. Второй частичный шаг – расстояние в элементарных (реальных) пазах между конечной стороной секции и начальной

стороной следующей секции. Результирующий шаг определяется как сумма первого и второго частичного шага.



а) петлевая обмотка; б) волновая обмотка
Рисунок 1.2 - Элементы схемы и обозначение шагов обмотки якоря

Первый частичный шаг в элементарных пазах

$$y_1 = \frac{z_{\vartheta}}{2p} \pm \varepsilon. \quad (1.3)$$

Первый частичный шаг в реальных пазах определяют по шагу y_1 и значению u_n :

$$y_{1n} = \frac{y_1}{u_n}. \quad (1.4)$$

Если первый частичный шаг y_{1n} - целое число, то обмотка является равносекционной, если шаг y_{1n} - дробное число, то обмотка является ступенчатой. Ступенчатые обмотки якоря сложнее в изготовлении и находят применение только в стержневых обмотках.

Результирующий шаг равняется шагу по коллектору. В простых петлевых обмотках

$$y = y_k = \pm 1. \quad (1.5)$$

Большее распространение получили обмотки с шагом $y = +1$.

В двухходовых петлевых обмотках

$$y = y_k = \pm 2. \quad (1.6)$$

В простых волновых обмотках шаг по коллектору равен

$$y_k = \frac{K \mp 1}{p}. \quad (1.7)$$

Второй частичный шаг, выраженный в элементарных пазов, определяют по первому частичному и результирующему шагу:

$$y_2 = y - y_1. \quad (1.8)$$

Второй частичный шаг, выраженный числом реальных пазов:

$$y_{2n} = \frac{y_2}{u_n}. \quad (1.9)$$

Простые волновые обмотки имеют то преимущество, что они не требуют уравнивающих соединений, имеют минимальное число параллельных ветвей $2a = 2$, что приводит при числе полюсов $2p > 2$ к уменьшению числа витков обмотки якоря и упрощению технологии обмоточных работ. Увеличение тока параллельной ветви приводит к улучшению использования зубцового слоя из-за уменьшения объёма изоляции. Область их применения ограничена током параллельной ветви и напряжением между коллекторными пластинами.

По условиям коммутации и из технологических соображений ток параллельной ветви обмотки якоря не должен превышать 250 – 300 (350) А.

Число параллельных ветвей обмотки якоря:

- для петлевых обмоток $2a = 2pt$;
- для волновых обмоток $2a = 2t$;
- для лягушачьих обмоток $2a = 2p \cdot 2t$.

В сериях машин постоянного тока применяются простые и двухходовые петлевые обмотки, простые волновые обмотки и лягушачьи обмотки.

Общими требованиями, предъявляемыми к якорным обмоткам, являются следующие условия симметрии:

- $\frac{N}{z}$ - целое число;
- $\frac{z}{a}$ - целое число;

(1.10)

- $\frac{K}{a}$ - целое число;
- $\frac{2p}{a}$ - целое число.

1.5.1 Простые петлевые обмотки

В машинах постоянного тока с числом полюсов $2p = 2$ число пазов на якоре принимают чётным. В четырёхполюсных машинах с целью улучшения коммутации и снижения пульсаций магнитного потока следует применять обмотки, у которых $\frac{z_2}{a}$ – нечётное число и $\frac{K}{a} = \frac{K}{p}$ – нечётное число. В этом случае число элементарных пазов в одном реальном может быть только нечётным числом ($u_n = 3; 5$). Обмотка снабжается уравнительными соединениями первого рода.

Пример выполнения схемы простой петлевой обмотки представлен на рисунке 1.3.

1.5.2 Двухходовые петлевые обмотки

Двухходовые петлевые обмотки имеют число параллельных ветвей $2a = 2pm$, где $m = 2$ – число ходов обмотки.

По условиям симметрии обмотки отношение $\frac{z_2}{a}$ – целое число. Число пар параллельных ветвей $a = m \cdot p = 2p$, следовательно, $\frac{z_2}{p}$ – чётное число и $\frac{K}{p}$ – чётное число. Для двухходовой петлевой обмотки число пазов якоря и число коллекторных пластин – чётные числа.

Кратность замыкания обмотки равна наибольшему общему делителю m и K , т.к. число ходов $m = 2$, а число коллекторных пластин K – чётное число, симметричная двухходовая петлевая обмотка двукратно замкнутая. Один ход содержит все чётные, а другой все нечётные коллекторные пластины. Шаг уравнительных соединений первого рода $y_{up1} = \frac{K}{p}$ – чётное число, а это значит, что уравнительные соединения первого рода соединяют все чётные или нечётные коллекторные пластины. Равнопотенциальные точки разных ходов находятся на различных сторонах якоря и соединяются уравнительными соединениями второго рода, проходящими через якорь, что является недостатком симметричных обмоток. Симметричные обмотки – ступенчатые.

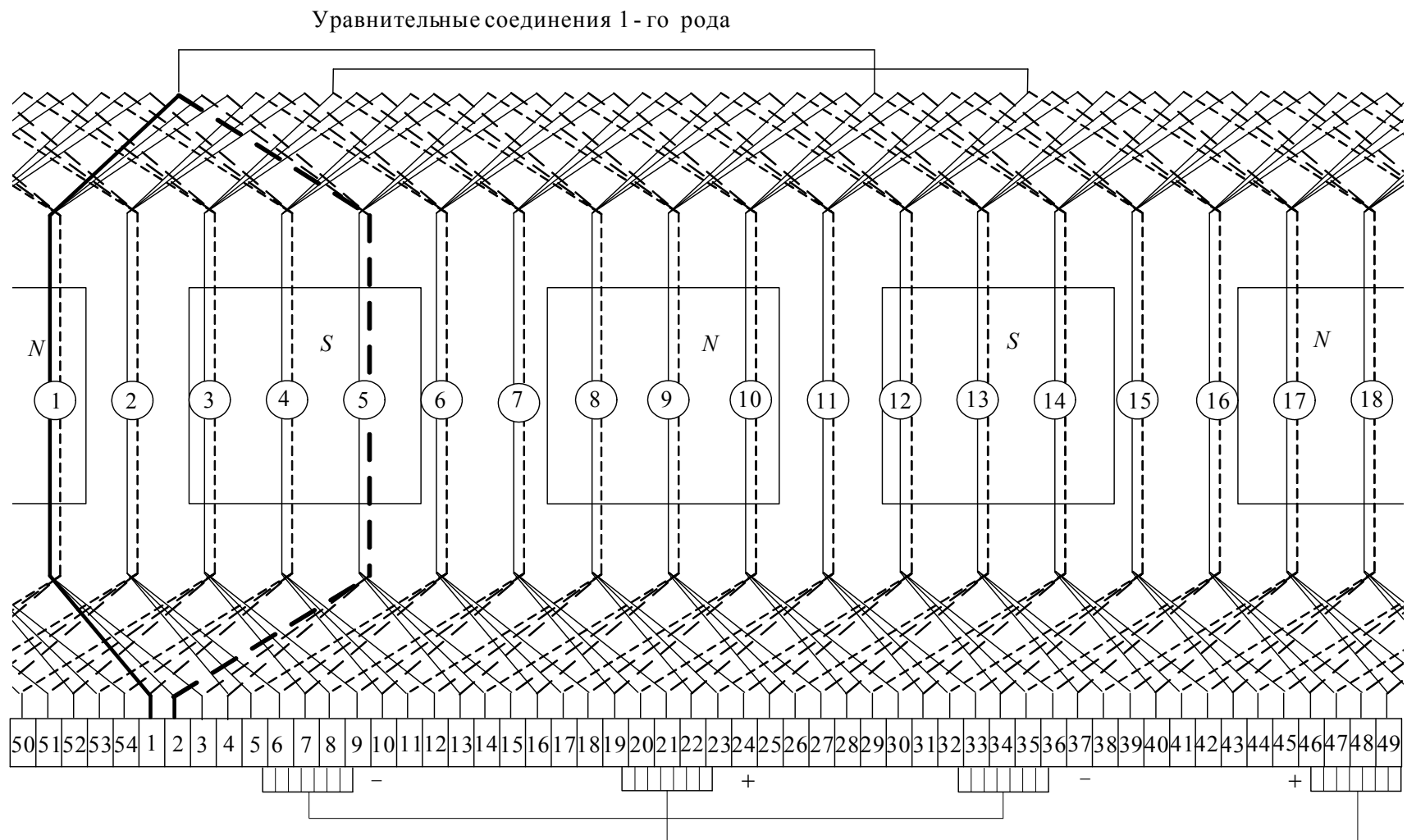


Рисунок 1.3 – Схема простой петлевой обмотки ($z_2 = 18$, $2p = 4$, $u_n = 3$, $y_1 = 12$, $y_2 = -11$, $y = y_k = 1$, $y_{yp} = 27$)

Применяются также несимметричные обмотки, у которых отношения $\frac{z_2}{p}$ и $\frac{K}{p}$ – нечётное число. Для несимметричных обмоток число элементарных пазов в одном реальном – нечётное число ($u_n = 3$ или 5).

Шаг уравнительного соединения первого рода y_{yp1} так же является нечётным числом. Уравнительные соединения первого рода располагаются с одной стороны якоря и подсоединяются к пластинам, принадлежащим разным ходам. Следовательно, они выполняют функцию и уравнительных соединений второго рода.

Применение несимметричных обмоток допустимо при числе пазов на полюс $\frac{z_2}{2p} \geq 13,5$.

1.5.3 Простые волновые обмотки

Простые волновые обмотки имеют число параллельных ветвей $2a = 2$. Обмотка симметричная, если число элементарных пазов в одном реальном u_n – нечётное число. Число пазов якоря z_2 – нечётное число. Волновая обмотка не требует уравнительных соединений.

У двигателей постоянного тока с высотой оси вращения $h \leq 315$ мм применяют равносекционную обмотку. В двигателях с большей высотой оси вращения, работающих в более тяжёлых условиях, с целью улучшения коммутации обмотку выполняют ступенчатой.

Пример выполнения схемы простой волновой обмотки представлен на рисунке 1.4.

1.5.4 Комбинированные обмотки

Петлевая и волновая обмотки, составляющие комбинированную или лягушачью обмотку, имеют одинаковое число параллельных ветвей. Каждая из обмоток имеет $2a = 2pt$ параллельных ветвей.

Проводники обеих обмоток имеют одинаковую площадь поперечного сечения обмоток и располагаются в пазу в четыре слоя: средние по высоте паза проводники принадлежат петлевой, а крайние – волновой обмотке.

Для обмотки выполняются условия:

$$\begin{aligned} y_{kn} + y_{кв} &= \frac{K}{p}; \\ y_{1n} + y_{1в} &= \frac{K}{p}; \\ y_{2n} &= y_{2в}. \end{aligned} \tag{1.11}$$

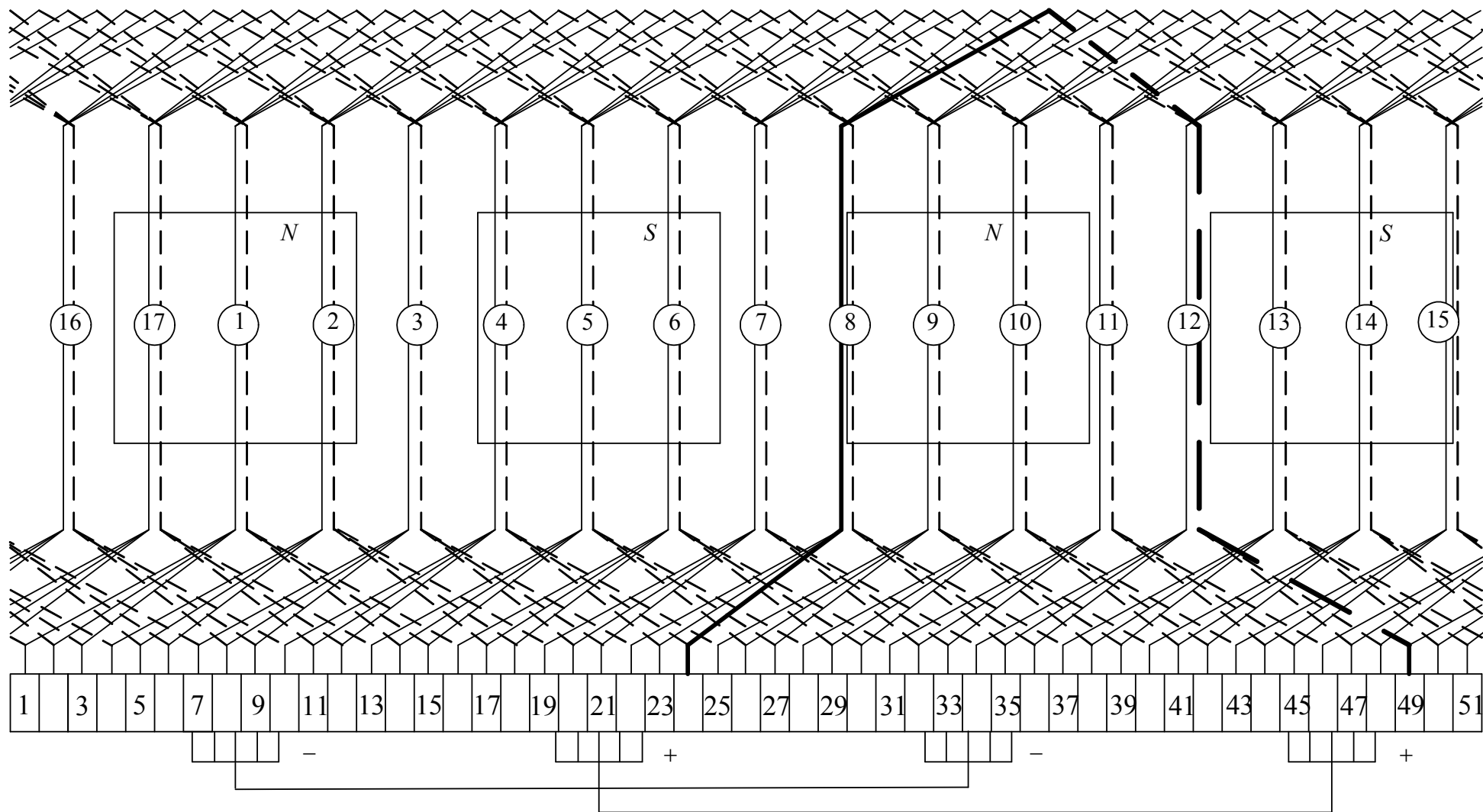


Рисунок 1.4 – Схема простой волновой обмотки ($z_2=17$, $2p=4$, $u_n=3$, $y_1=12$, $y_2=13$, $y_k=25$)

Лягушачья обмотка не требует уравнильных соединений, т.к. секция волновой обмотки по отношению к петлевой является уравнителем первого рода, а секция петлевой обмотки, по отношению к волновой обмотке является уравнителем второго рода.

В целях удобства расчёта лягушачьей обмотки, целесообразно её рассматривать как петлевую с параллельными проводниками по высоте паза. При этом условия выполнения, расчёт шагов и конструкция изоляции должны соответствовать лягушачьей обмотке.

1.5.5 Уравнильные соединения

При соблюдении всех условий симметрии возможно нарушение равенства ЭДС параллельных ветвей обмотки якоря вследствие магнитной несимметрии и различия в сопротивлениях щётчного контакта отдельных щётчных болтов. Это приводит к возникновению уравнильных токов, которые замыкаются через щётчные контакты. С целью разгрузки щётчного контакта используют уравнильные соединения.

Теоретически обмотка якоря имеет p равнопотенциальных точек, поэтому шаг уравнильных соединений

$$y_y = \frac{K}{p}. \quad (1.12)$$

Полное число уравнильных соединений

$$N_y = \frac{K}{a}. \quad (1.13)$$

Уравнильные соединения размещают либо со стороны коллектора, впаявая их в коллекторные пластины, либо с противоположной стороны, припаявая их к головкам секций. Число уравнильных соединений принимается от одного на паз до 20 % от полного возможного числа.

Сечение уравнильных соединений составляет 20...30 % от сечения эффективного проводника обмотки якоря.

В простых петлевых обмотках выполняются уравнильные соединения первого рода, а в сложных петлевых – как первого, так и второго рода. Уравнильные соединения второго рода служат для выравнивания электрической асимметрии разных ходов обмотки.

1.6 Компенсационная обмотка

Компенсационная обмотка предназначена для компенсации поперечного поля якоря в зоне полюсной дуги. Обмотка выполняется в машинах постоянного тока при диаметрах якоря свыше 0,3 м, а также в машинах с

$\frac{P_n}{n_{ном}} > 0,2 \frac{кВт}{об/мин}$ или с широким диапазоном регулирования частоты вращения.

Конструктивно компенсационная обмотка выполняется однослойной стержневой или катушечной (секционной) и укладывается в пазы, выполненные в полюсных наконечниках, таким образом, чтобы ось обмотки совпадала с поперечной осью (с осью добавочных полюсов).

Стержневую обмотку размещают в прямоугольных полузакрытых пазах. Стержни изготавливают из неизолированной меди, изолируют, а затем вставляют в паз с торца. Лобовые части обмотки имеют форму дуг и соединяются со стержнями либо пайкой, либо болтами. Для выдерживания между дугами расстояния в 5 – 6 мм, устанавливают прокладки из стеклотекстолита, которые закрепляют бандажами.

Секционные компенсационные обмотки укладывают в открытые прямоугольные пазы и крепят с помощью клиньев. Секции изготавливают из неизолированных проводов намоткой на шаблонах с последующим изолированием.

В машинах постоянного тока серии 2П компенсационная обмотка выполняется при высоте оси вращения $h \geq 355 \text{ мм}$.

2 Главные размеры и электромагнитные нагрузки

Проектирование двигателей постоянного тока начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются, выполняя все виды расчётов и разрабатывая конструкцию отдельных узлов и деталей.

Расчёт двигателя начинают с определения главных размеров машины и выбора основных электромагнитных нагрузок. Под главными размерами машины понимают диаметр якоря D и расчётную длину машины l_δ .

Главные размеры машины связаны с электромагнитными нагрузками (A и B_δ), коэффициентом α_δ и расчётной мощностью машины P' :

$$l_\delta = \frac{60 \cdot P'}{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A \cdot D^2 \cdot n_{ном}}, \quad (2.1)$$

где α_δ – расчётный коэффициент полюсного перекрытия;

B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре машины, Тл;

A – линейная токовая нагрузка, А/м;

$n_{ном}$ – частота вращения ротора, об/мин.

Расчётная мощность машины может быть определена только после полного расчёта машины при расчёте её рабочих характеристик. Предварительно расчётная мощность принимается равной

$$P' = k_\partial \cdot \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}}, \quad (2.2)$$

где k_∂ – коэффициент, выбирается по таблице 2.1;

$P_{ном}$ – номинальная мощность двигателя, Вт;

Таблица 2.1 – Значения коэффициентов k_∂ и k_ϵ

Мощность машины, кВт	k_∂	k_ϵ	Мощность машины, кВт	k_∂	k_ϵ
Менее 1	0,65-0,85	0,2-0,080	10-100	0,85-0,97	0,035-0,02
1-10	0,82-0,95	0,1-0,025	100-1000	0,93-0,98	0,02-0,005

Для машин общего назначения

$$P' = P_{ном} \cdot \frac{1 + \eta_{ном}}{2 \cdot \eta_{ном}}, \quad (2.3)$$

где $\eta_{ном}$ – номинальный коэффициент полезного действия, КПД.

Значение КПД определяется заданием на проектирование. Если в задании на проектирование КПД не оговаривается, то его можно принять таким же как и в машине-аналоге, например, по приложению А или по данным справочной литературы [9].

Машины современных серий имеют единую шкалу высот оси вращения. Высота оси вращения h определяется заданием на проектирование или определяется по данным машины-аналога. Внешний диаметр корпуса машины (m) при известной высоте оси вращения не должен превышать значения

$$D_{вн} = 2 \cdot h - (8 - 10) \cdot 10^{-3}. \quad (2.4)$$

Диаметр якоря для четырёхполюсных машин можно принять равным

$$D \approx h. \quad (2.5)$$

Выбрать диаметр якоря и наружный диаметр корпуса машины при известной высоте оси вращения можно, воспользовавшись данными таблицы 2.2.

Таблица 2.2

Высота оси вращения, мм	$2p$	D , мм	$D_{вн}$, мм
80	2	73	152
90	2	82	170
100	2	93	190
112	4	109	214
132	4	130	252
160	4	160	308
180	4	181	346
200	4	202	386
225	4	230	436
250	4	258	484
280	4	290	544
315	4	330	612

Число главных полюсов $2p$ машины влияет на технико-экономические показатели машины. При увеличении числа полюсов уменьшается ток якоря, приходящийся на щёточный болт, что уменьшает длину коллектора, уменьшается длина лобовых частей обмотки якоря и длина всей машины. При увеличении числа полюсов уменьшается магнитный поток в воздушном зазоре, приходящийся на один полюс. Это приводит к уменьшению сечения станины и снижению её массы. Увеличение числа полюсов машины приводит к повышению напряжения между коллекторными пластинами, уменьшается расстояние между полюсами, из-за чего приходится снижать значение коэффициента полюсного перекрытия, что в свою очередь снижает использование активного объёма

машины. При увеличении числа полюсов возрастает трудоёмкость изготовления машины.

В двигателях постоянного тока общего назначения при диаметрах якоря D до 0,1 м число главных полюсов рекомендуется принимать равным двум ($2p = 2$), а при диаметрах якоря от 0,112 м до 0,5 м – четырёх ($2p = 4$). Число полюсов в двигателях серии 2П в зависимости от высоты оси вращения представлено в таблице 2.2.

Расчётный коэффициент полюсного перекрытия α_δ неоднозначно влияет на свойства машины. При увеличении коэффициента α_δ возрастает степень использования активного объёма машины. В то же время его рост приводит к уменьшению расстояния между полюсами. Возрастают потоки рассеяния главных полюсов, а коммутация машины ухудшается. Рекомендуемые значения коэффициента α_δ приведены на рисунке 2.1.

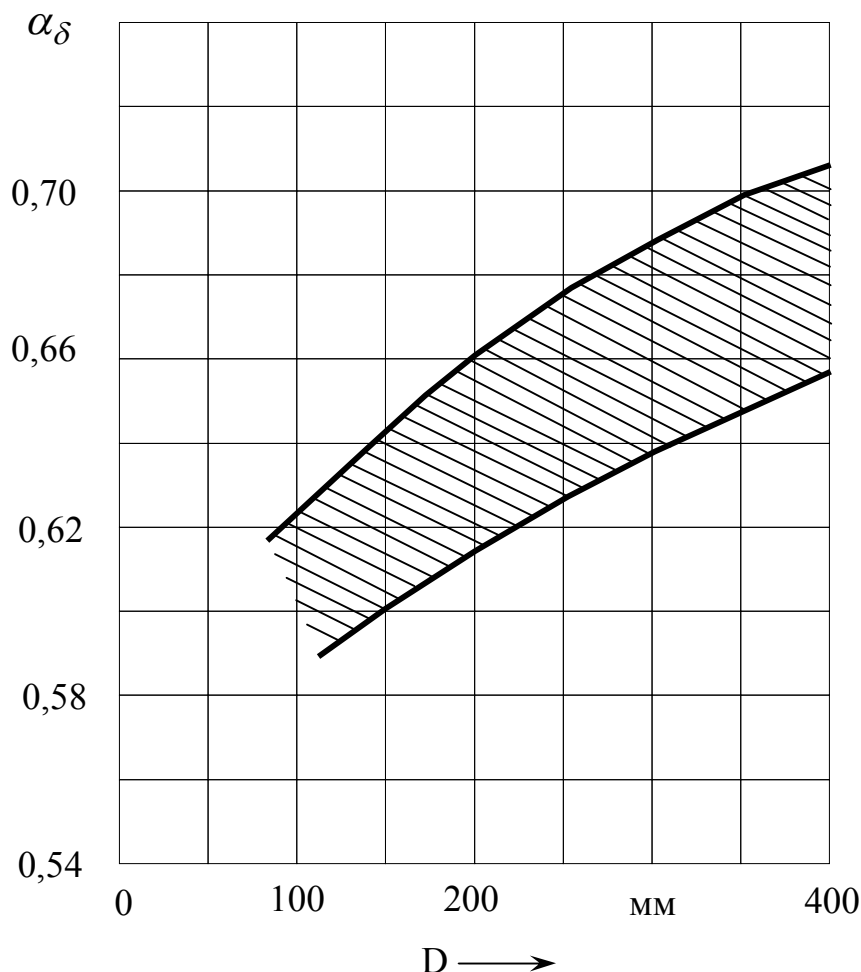


Рисунок 2.1 – Зависимость расчётного коэффициента полюсного перекрытия от диаметра якоря

Размеры двигателя постоянного тока обратно пропорциональны электромагнитным нагрузкам A и B_δ . Чем они выше, тем лучше используется объём

ём якоря. Однако, с ростом линейной нагрузки увеличивается нагрев якоря и машины, ухудшается коммутация. С ростом магнитной индукции в воздушном зазоре возрастает насыщение участков магнитной цепи. Электромагнитные нагрузки оказывают влияние и на коммутацию. Выбрать оптимальные нагрузки на начальном этапе проектирования невозможно. Поэтому обычно пользуются данными, полученными в результате анализа электромагнитных нагрузок в ранее спроектированных сериях машин.

Рекомендуемые значения магнитной индукции B_δ и линейной нагрузки A для машин общего назначения приведены на рисунках 2.2 и 2.3.

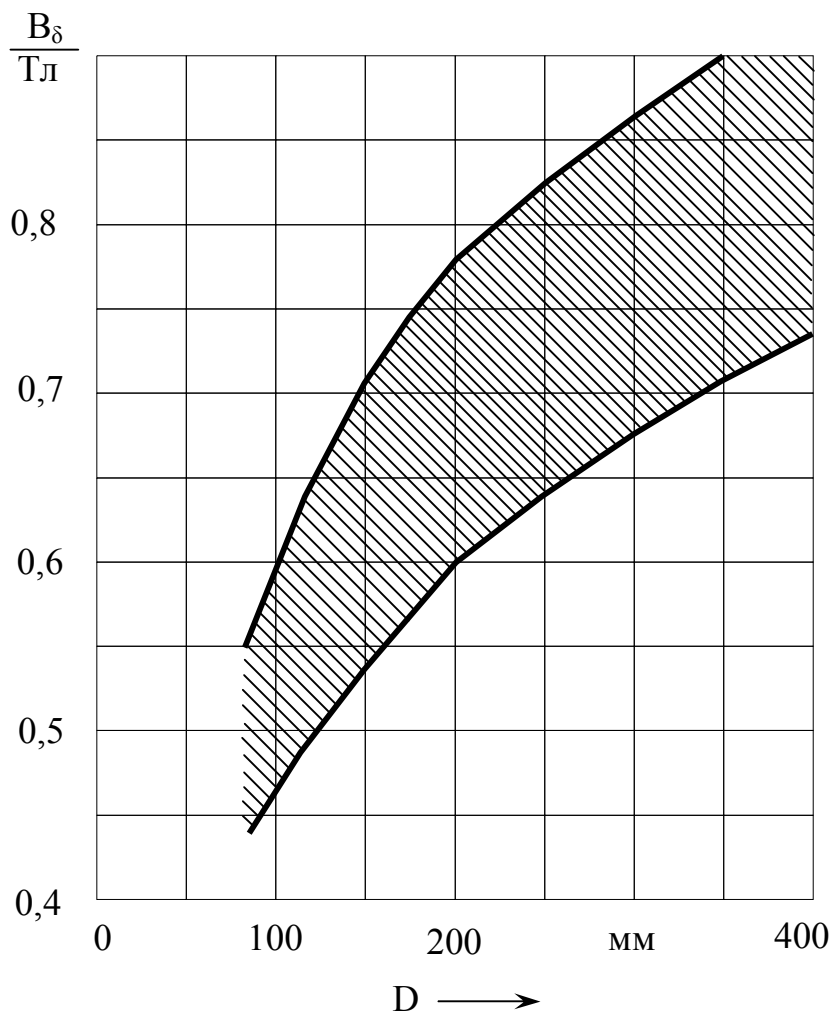


Рисунок 2.2 – Зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре от диаметра якоря

Выбор конкретных значений нагрузок зависит от степени защиты и способа охлаждения машины, от предельной допустимой температуры, которая определяется классом нагревостойкости изоляции, от частоты вращения якоря, которая влияет на теплоотдачу. Большие значения линейной нагрузки следует выбирать для хорошо охлаждаемых машин, работающих при сравнительно лёгких условиях коммутации, а меньшие – для тихоходных машин, работающих с

перегрузками и частыми реверсами, а также для машин с уменьшенным воздушным зазором.

Выбор больших значений магнитной индукции можно рекомендовать для машин, работающих с большими перегрузками, например, для двигателей прокатных станов.

Выбранные электромагнитные нагрузки должны быть откорректированы после проектирования зоны зубцов якоря.

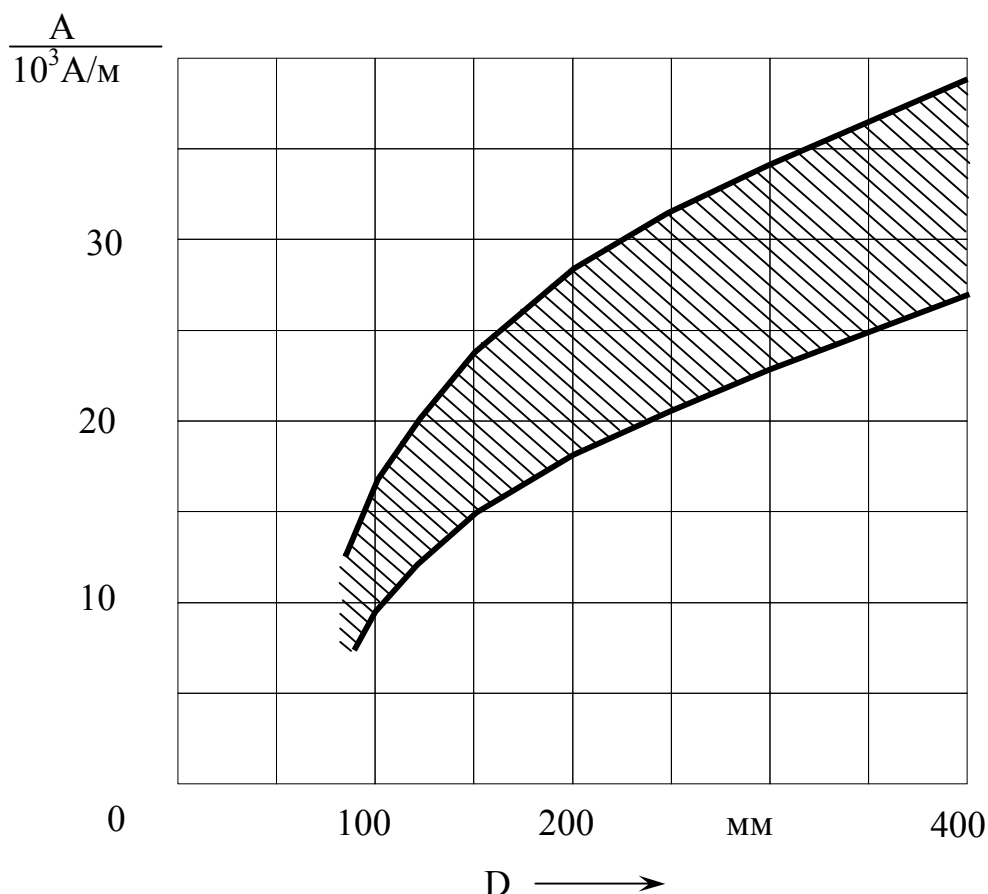


Рисунок 2.3 – Зависимость линейной нагрузки от диаметра якоря

Выбранные электромагнитные нагрузки, коэффициент α_δ и диаметр якоря позволяют вычислить по формуле (2.1) расчётную длину машины l_δ , значение которой необходимо проверить по отношению

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D}. \quad (2.6)$$

Данное отношение должно приближаться к максимальному допустимому λ_{max} , представленному на рисунке 2.4, но не превышать его. Если на данной высоте оси вращения выполняются машины нескольких мощностей, то это требование распространяется только на машину большей мощности (большей длины). Анализируя полученное значение коэффициента λ , необходимо иметь

в виду, что с увеличением длины машины уменьшается относительная длина лобовых частей, возрастает КПД, снижается момент инерции якоря, но при этом ухудшается коммутация и ухудшаются условия охлаждения машины.

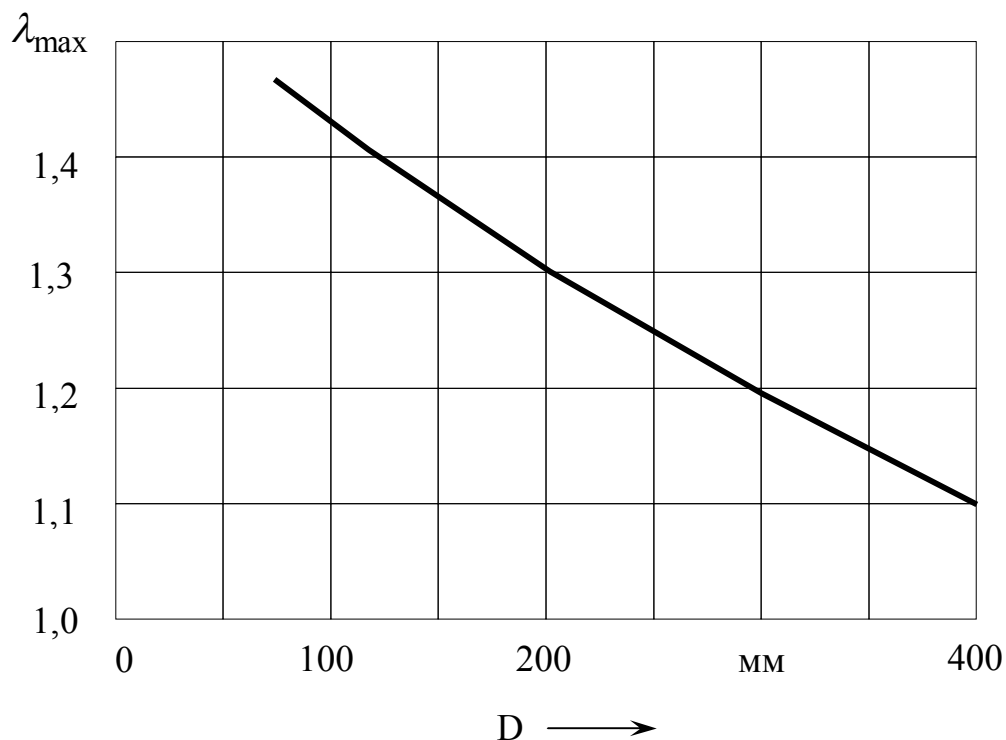


Рисунок 2.4 - Предельные значения коэффициента λ в зависимости от диаметра якоря

Если расчётная длина машины не превышает 350 мм, то магнитопровод якоря выполняется без радиальных каналов. В машинах серии 2П радиальные каналы на якоре не выполняются. Длина магнитопровода якоря для машин без радиальных каналов принимается равной расчётной длине машины:

$$l_2 = l_{\delta}. \quad (2.7)$$

Номинальный ток двигателя (предварительное значение), А

$$I_n = \frac{P_{ном}}{U_n \cdot \eta_{ном}}, \quad (2.8)$$

где U_n – номинальное напряжение, В.

Для выбора типа обмотки якоря двигателя постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения определяют номинальный ток якоря, А:

$$I_{2н} = I_n \cdot (1 - k_{\epsilon}), \quad (2.9)$$

где $k_g = \frac{i_g}{I_n}$ – коэффициент, значение которого следует принять по таблице 2.1.

В машинах общего назначения при $2p = 2$ выбирают простую петлевую обмотку. При $2p = 4$ и токе якоря I_{2n} до 600 А выбирают простую волновую обмотку. Если при этом число витков обмотки якоря или число коллекторных пластин получается малым, то можно выбрать простую петлевую обмотку. При токах якоря от 500 А до 1400 А выбирают простую петлевую обмотку. При токах якоря свыше 1400 А выбирают двухходовую петлевую обмотку. Если машина быстроходная ($v_2 > 40 \text{ м/с}$) и работает с большими перегрузками ($I_{\max}/I_n > 2$), то предпочтение отдаётся лягушечьей обмотке.

Простые петлевые обмотки имеют число параллельных ветвей $2a = 2p$. Простые волновые обмотки имеют $2a = 2$. Двухходовые петлевые обмотки имеют $2a = 2pt$, а лягушечьи обмотки имеют $2a = 2p \cdot 2m$, где m – число ходов обмотки.

Ток параллельной ветви обмотки якоря, А

$$I_a = \frac{I_{2n}}{2a}. \quad (2.10)$$

Число проводников обмотки якоря (предварительно)

$$N' = \frac{A \cdot \pi \cdot D}{I_a}. \quad (2.11)$$

Число зубцов якоря следует выбирать с учётом рекомендаций подраздела 1.5 и ориентировочного значения зубцового деления t_{z2} , приведённого в таблице 2.3 для разных высот оси вращения. Определив число пазов якоря для предельных значений зубцового деления, получают некоторый диапазон возможных значений z_2 :

$$z_{2 \min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z2 \max}}, \quad (2.12)$$

$$z_{2 \max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z2 \min}}$$

из которого и производят выбор числа пазов.

Таблица 2.3

$h, \text{мм}$	80 – 200	225 - 315
$t_{z2}, \text{мм}$	10 – 20	15 - 35

Число эффективных проводников в пазу

$$N'_n = \frac{N'}{z_2}. \quad (2.13)$$

При двухслойной обмотке якоря число проводников в пазу должно быть чётным.

Число элементарных пазов в одном реальном u_n выбирается в зависимости от типа обмотки якоря с учётом рекомендаций подраздела 1.5.

Число витков в секции

$$w'_s = \frac{N'_n}{2 \cdot u_n}. \quad (2.14)$$

В двигателях с полужакрытыми пазами выпная обмотка якоря может иметь дробное число витков в секции:

$$w_s = b + \frac{c}{u_n}, \quad (2.15)$$

где b – целая часть числа;

$\frac{c}{u_n}$ – правильная дробь.

Например, при волновой обмотке с $u_n = 3$ число витков в пазу в секциях одного слоя может быть равным $2 - 3 - 2$, т.е. расчётное число витков в секции

$$w_s = 2\frac{1}{3}.$$

В двигателях с открытыми пазами число витков в секции округляют до ближайшего целого числа.

Число коллекторных пластин

$$K = z_2 \cdot u_n. \quad (2.16)$$

Среднее напряжение между коллекторными пластинами, В

$$U_{к.ср} = \frac{2p \cdot U_{ном}}{K}. \quad (2.17)$$

Для серийных машин это напряжение не должно превышать 16 В.

С целью удобства анализа вариантов исполнения зоны зубцов якоря результаты расчётов удобно заносить в таблицу вида 2.4.

Таблица 2.4

№ варианта	z_2	u_n	$K = u_n \cdot z_2$	$w_s = \frac{N}{2K}$	$U_{к.ср}$
1					
2					
...					
n					

После выбора исполнения зоны зубцов якоря уточняют число проводников обмотки якоря:

$$N = 2 \cdot w_s \cdot z_2 \cdot u_n. \quad (2.18)$$

Число витков обмотки якоря:

$$w_2 = \frac{N}{2}. \quad (2.19)$$

Коллекторное деление по условиям изготовления в зависимости от диаметра коллектора должно быть не менее значений, приведённых в таблице 2.5.

Диаметр коллектора зависит от его исполнения. Коллектор выполняется без петушков, если обмотка якоря выполняется из круглого эмалированного провода и произведение $2 \cdot d \cdot c < 9 \text{ мм}$, где d – диаметр элементарного проводника, а c – число элементарных проводников. В остальных случаях коллектор выполняется с петушками. Диаметр коллектора выбирают 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 без петушков должен находиться в пределах:

$$D'_k = (0,75...0,8) \cdot D, \quad (2.20)$$

а диаметр коллектора с петушками

$$D'_k = (0,65...0,7) \cdot D. \quad (2.21)$$

После выбора диаметра коллектора определяют коллекторное деление

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K} \geq t_{k\min}. \quad (2.22)$$

и окружную скорость коллектора

$$v_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_n}{60} < 40 \text{ м/с}. \quad (2.23)$$

Таблица 2.5 – Минимальное коллекторное деление

$D_K, мм$	125	140...280	315...500
$t_{K\min}, мм$	3	3,5	3,8

Уточнённое значение линейной токовой нагрузки, А/м:

$$A = \frac{2 \cdot u_n \cdot z_2 \cdot w_s \cdot I_a}{\pi \cdot D}. \quad (2.24)$$

Зубцовое деление при выбранном числе зубцов якоря:

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D}{z_2}. \quad (2.25)$$

По условиям коммутации ток в одном пазу $I_n = A \cdot t_{z2}$ не должен превосходить 1500...1600 А при диаметрах якоря $D < 1000 мм$.

Полюсное деление по внешнему диаметру якоря, м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}. \quad (2.26)$$

Расчётная ширина наконечника полюса, м:

$$b_p = \alpha_\delta \cdot \tau. \quad (2.27)$$

Номинальная электродвижущая сила в обмотке якоря, В

$$E_n = \frac{P'}{I_{2n}}. \quad (2.28)$$

Номинальный магнитный поток в воздушном зазоре, Вб

$$\Phi_\delta = \frac{60 \cdot a \cdot E_n}{p \cdot N \cdot n_{ном}}. \quad (2.29)$$

Магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{b_p \cdot l_\delta}. \quad (2.30)$$

Если полученное значение магнитной индукции в воздушном зазоре значительно отличается от ранее выбранного значения, то необходимо пересчитать расчётную длину машины.

3 Расчёт размеров зоны зубцов и обмотки якоря

3.1 Изоляция обмоток якорей машин постоянного тока

В машинах постоянного тока мощностью до 30...40 кВт обмотка якоря выполняется насыпной из круглого обмоточного провода и укладывается в полузакрытые пазы овальной формы, рисунок 3.1. Катушки обмотки изготавливают намоткой на специальных шаблонах и укладывают (всыпают) в пазы через шлиц. Размеры шлица паза якоря должны обеспечивать технологичность укладки катушек обмотки.

Конструкция изоляции обмотки представлена в таблице 3.1.

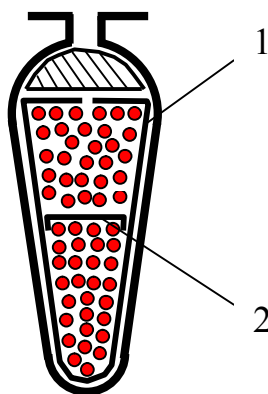


Рисунок 3.1 – Овальный паз якоря

Таблица 3.1 – Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока с высотой оси вращения 80 – 200 мм (напряжение до 600 В)

Высота оси вра- щения, мм	Пози- ция на рисунке 3.1	Материал			Толщи- на, мм	Число слоёв	Односто- ронняя толщина изоляции, мм
		Наименование, марка					
		Класс нагревостойкости					
		В	Ф	Н			
80-112	1 2	Плёнкостеклопласт			0,35 0,35	1 1	0,35 0.35
		Изофлекс	Имидофлекс				
		Изофлекс	Имидофлекс				
132-200	1 2	Плёнкостеклопласт			0,25 0,25	2 2	0,5 0,5
		Изофлекс	Имидофлекс				
		Изофлекс	Имидофлекс				

Корпусная изоляция выполняется из изофлекса или имидофлекса. Для повышения надёжности изоляции в месте выхода из паза она отгибается на 180° в виде манжеты. Между верхним и нижним слоем в пазах и в лобовых

частях обмотки размещают изоляционные прокладки. Лобовые части обмотки дополнительно не изолируют. Прокладка между катушками в лобовых частях обмотки выполняется из того же материала.

Обмотка крепится в пазу с помощью клина из стеклотекстолита полу-круглого поперечного сечения. Лобовые части обмотки располагают на обмоткодержателях, где их закрепляют с помощью бандаж из нетканой стеклоленты.

В серийных машинах постоянного тока мощностью свыше 30 кВт обмотка якоря выполняется из прямоугольного провода в виде жёстких катушек. Все секции, принадлежащие одной катушке, имеют общую пазовую изоляцию. Катушки изготавливают на шаблонах, изолируют, опрессовывают и закладывают в открытые прямоугольные пазы. Между верхним и нижним слоем катушек в пазу размещают прокладки из стеклотекстолита, а в лобовых частях обмотки – полосы из лакостеклослюдопласта или гибкого миканита. Конструкция изоляции обмотки якоря показана на рисунке 3.2 и приведена в таблице 3.2.

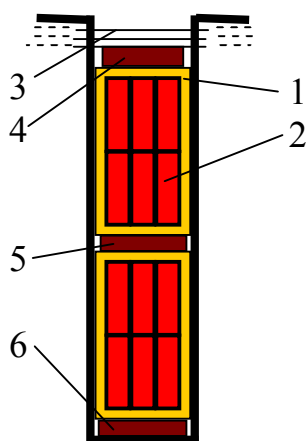


Рисунок 3.2 – Открытый прямоугольный паз якоря

В пазовой части обмотка крепится с помощью бандаж, а при высоте оси вращения $h \geq 355\text{ мм}$ обмотка крепится с помощью клина из стеклотекстолита. Лобовые части обмотки якоря размещают на обмоткодержателях и крепят с помощью бандаж.

Бандаж может выполняться из нетканой стеклоленты или из стальной лужёной проволоки. Бандаж, в области пазовой части обмотки, размещают в бандажных канавках, представляющих собой кольцевые проточки на поверхности якоря. Ширина одной бандажной канавки не превышает 20 мм , а общая ширина всех бандажных канавок на поверхности якоря не должна превышать 35% длины магнитопровода якоря. Бандаж из стеклоленты находит всё большее распространение. При его применении не требуется изоляция бандажа от магнитопровода якоря, в стеклобандаже не возникают добавочные потери мощности. В то же время, материал бандажа (стеклолента) допускает меньшие

Таблица 3.2 – Изоляция обмотки якоря машин постоянного тока (пазы открытые прямоугольные, напряжение до 600 В)

Часть обмотки	Позиция по рисунку 3.2	Материал, марка		Толщина, мм	Число слоёв	Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Класс нагревостойкости				по ширине	по высоте при w_s			
							1	2	3	4
Пазовая	1	Синтофол ий F	Синтофол ий H	0,16	3,5 оборота 0 - 6	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2			0,16			0,3	0,6	0,9	
	3	Стеклолакоткань ЛПС		0,15	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
	4 5 6	Стеклотекстолит								
		СТЭФ	СТК	0,5	1		0,5	0,5	0,5	0,5
		СТЭФ	СТК	0,5	1		0,5	0,5	0,5	0,5
		СТЭФ	СТК	0,5	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)				1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
Лобовая	7	Плѐнка полиамидная		0,15	1 вполнахлѐста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Лента стеклянная		0,10	1 вполнахлѐста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)				1	1	1	1	1	

напряжения на разрыв, чем проволочный бандаж, и для его размещения требуется больше места.

В машинах постоянного тока при высоте оси вращения $h \leq 200$ мм обмотка якоря выполняется из круглого обмоточного провода. Обмотка укладывается в полузакрытые пазы овальной формы. При большей высоте оси вращения ($h \geq 200$ мм) обмотка якоря выполняется из прямоугольного обмоточного провода и укладывается в открытые прямоугольные пазы.

3.2 Расчет размеров овальных пазов и обмотки якоря

Сердечник якоря собирают из отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, покрытых изоляционным лаком для уменьшения потерь мощности в стали от вихревых токов. Коэффициент заполнения магнитопровода якоря сталью $k_c = 0,95$. Рекомендуемые марки электротехнической стали приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Высота оси вращения, мм	80 - 200	225 - 315	355 - 500
Марка стали	2013	2312	2411

При сборке сердечника якоря размеры паза якоря в штампе и в свету не совпадают из-за смещения листов друг относительно друга. Припуски на сборку сердечника приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Высота оси вращения, мм	Припуск на сборку сердечника по ширине паза b_c (мм) для штампов		Припуск на сборку сердечника по высоте паза h_c (мм) для штампов	
	компаундный	пазный	компаундный	пазный
80 – 132	0,1	0,15	-	-
160 – 200	0,2	0,25	-	-
225 – 315	0,3	0,35	0,3	0,35
355 - 500	0,35	0,4	0,3	0,35

Компаундные штампы применяют при массовом производстве машин, а пазные – при изготовлении небольшой партии машин.

Плотность тока в обмотке якоря, предварительно, определяют по значению произведения токовой нагрузки на плотность тока в проводниках (AJ), которое выбирают по рисунку 3.3 в зависимости от класса нагревостойкости изоляционного материала, и уточнённому значению токовой нагрузки (A):

$$J'_2 = \frac{AJ}{A}. \quad (3.1)$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки якоря, м^2

$$q_a' = \frac{I_{2H}}{2a \cdot J_2'} \quad (3.2)$$

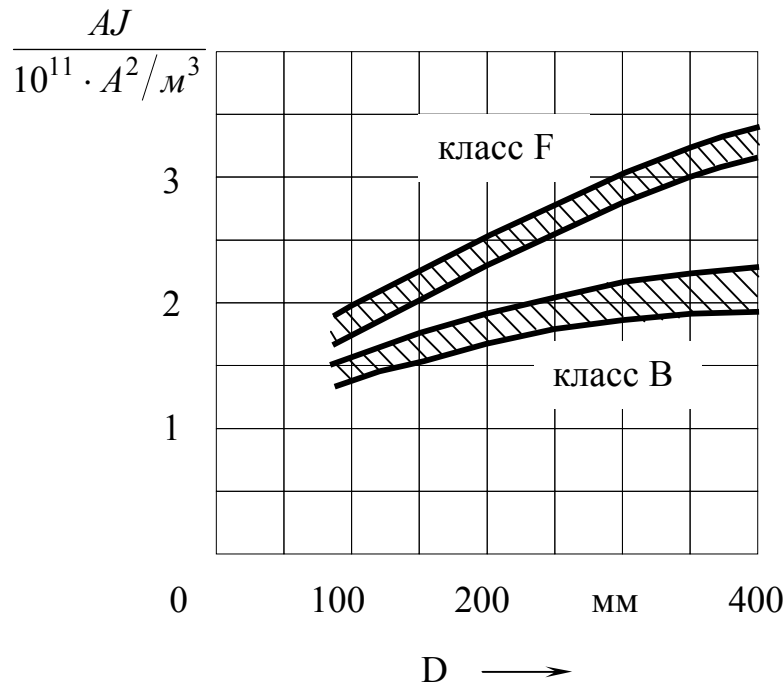


Рисунок 3.3 – Зависимость произведения AJ от диаметра якоря

Эффективный проводник насыпной обмотки якоря подразделяют на элементарные, если его сечение превышает $2,27 \text{ мм}^2$.

Для насыпных обмоток якорей машин постоянного тока применяют при изоляции класса нагревостойкости B обмоточный провод марки ПЭТВ, при изоляции класса F – провод марки ПЭТ–155, класса H – провода марки ПЭТ–200 или ПСДКТ.

После выбора числа элементарных проводников в одном эффективном $n_{эл}$ и размеров элементарного проводника (приложение Б) уточняют сечение эффективного проводника

$$q_a = n_{эл} \cdot q_{эл}, \quad (3.3)$$

где $q_{эл}$ – площадь поперечного сечения выбранного элементарного проводника.

По сечению эффективного проводника уточняют плотность тока в обмотке якоря, $\text{А}/\text{м}^2$

$$J_2 = \frac{I_{2н}}{2a \cdot q_a} \quad (3.4)$$

и произведение AJ . Полученное значение произведения AJ не должно превышать предельных допустимых значений, приведённых на рисунке 3.3.

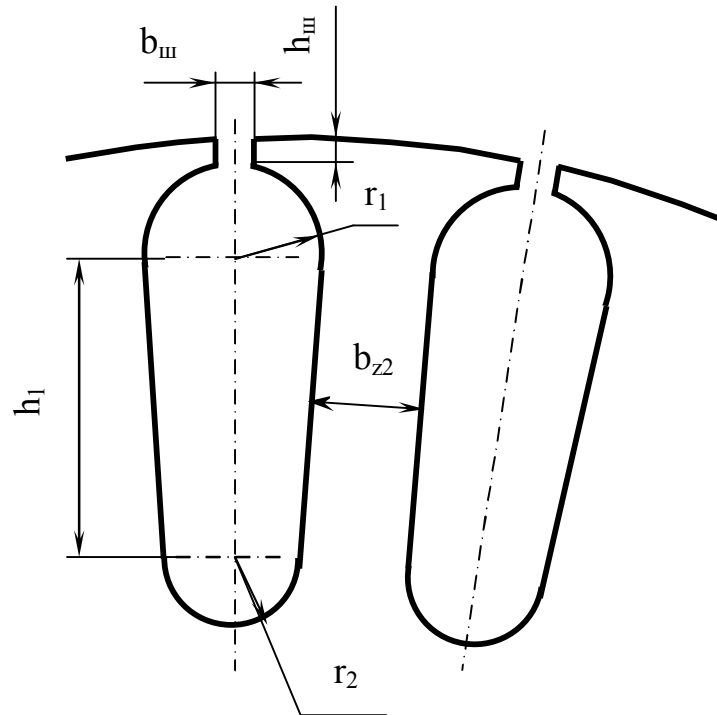


Рисунок 3.4 – Размеры полузакрытых овальных пазов

При овальных пазах якоря зубцы якоря имеют параллельные стенки, рисунок 3.4. Ширину зубца (m), предварительно, определяют по допустимому значению магнитной индукции в зубце B_{z2} , которую выбирают по таблице 3.5:

$$b'_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2}}{B_{z2} \cdot k_c}. \quad (3.5)$$

Допустимое значение магнитной индукции в зубце выбирают в зависимости от исполнения двигателя по степени защиты, способа охлаждения и частоты перемагничивания магнитопровода якоря:

$$f = \frac{p \cdot n_n}{60}, \quad (3.6)$$

где p – число пар полюсов;

n_n – номинальная частота вращения, $об/мин$.

Высоту паза якоря h'_{n2} выбирают, предварительно, по рисунку 3.5.

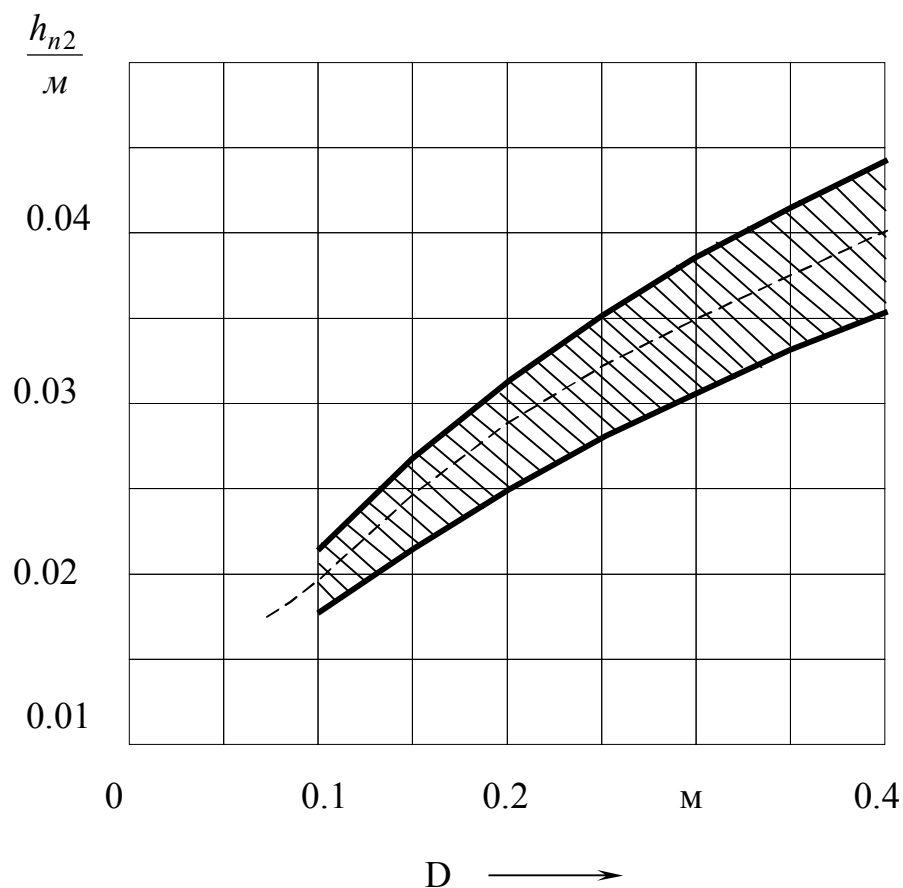


Рисунок 3.5 – Зависимость высоты паза от диаметра якоря

Таблица 3.5 – Предельные допустимые значения магнитной индукции в зубцах якоря (пазы овальные)

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция B_z , 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, IC0041	1,3 – 1,5	1,3 – 1,6	1,5 – 1,7	1,55 – 1,75

Для предварительной оценки магнитной индукции в ярме якоря определяют (или выбирают) диаметр отверстия в магнитопроводе якоря под вал, см:

$$D_o \approx 27 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{ном}}{n_{ном}}}, \quad (3.7)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность, кВт;

n_n – номинальная частота вращения, об/мин.

Внутренний диаметр магнитопровода якоря можно также выбрать по таблице 3.6 в зависимости от высоты оси вращения.

Таблица 3.6 – Внутренний диаметр магнитопровода якоря

Высота оси вращения, мм	90	100	112	132	160	180	200
D_o , мм	24	28	38	50	55	60	65

Магнитопроводы якорей машин постоянного тока со вспыной обмоткой якоря выполняются без осевых каналов. В этом случае высота спинки якоря равна

$$h'_j = \frac{D - D_o}{2} - h'_{n2}. \quad (3.8)$$

Магнитная индукция (ожидаемая) в спинке якоря, Тл

$$B'_j = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot h'_j \cdot l_2 \cdot k_c}. \quad (3.9)$$

Полученное значение магнитной индукции B_j не должно превышать предельных допустимых значений, представленных в таблице 3.7.

Высоту шлица паза якоря $h_{ш}$ из технологических соображений следует принять равной 0,5 – 0,8 мм. Ширину шлица паза якоря принимают равной $b_{ш} \approx d_{из} + (1,5...2) \text{ мм}$.

Размеры паза ротора r_1 , r_2 и h_1 определяются таким образом, чтобы обеспечить параллельные стенки паза на высоте h_1 :

- больший радиус паза, м

$$r_1 = \frac{\pi(D - 2 \cdot h_{ш}) - z_2 \cdot b'_{z2}}{2(z_2 + \pi)}; \quad (3.10)$$

- меньший радиус паза, м

$$r_2 = \frac{\pi(D - 2 \cdot h'_{n2}) - z_2 \cdot b'_{z2}}{2(z_2 - \pi)}; \quad (3.11)$$

- расстояние h_1 , м

$$h_1 = h'_{n2} - h_{ш} - r_1 - r_2. \quad (3.12)$$

Таблица 3.7 – Предельные допустимые значения магнитной индукции в ярме якоря

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция B_j , Тл, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	ниже 50
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,4	1,4	1,4	1,45
IP44, IC0141	1,15	1,15	1,15	1,2
IP44, C0041	1,05	1,05	1,05	1,1

Полученные размеры паза округляют до десятых долей миллиметра и уточняют высоту паза:

$$h_{n2} = h_1 + h_{из} + r_1 + r_2. \quad (3.13)$$

Площадь сечения пазовой изоляции, м^2

$$S_{из} = b_{из} (2\pi \cdot r_1 + \pi \cdot r_2 + 2 \cdot h_1), \quad (3.14)$$

где $b_{из}$ – толщина пазовой изоляции, м.

Площадь поперечного сечения пазового клина и прокладки между слоями, м^2

$$S_{\kappa} = (0,003...0,005) \cdot r_1. \quad (3.15)$$

Площадь паза в свету, м^2

$$S_{св} = \frac{\pi}{2} \cdot [(r_1 - b_c)^2 + (r_2 - b_c)^2] + (r_1 + r_2 - 2b_c) \cdot h_1. \quad (3.16)$$

Коэффициент заполнения свободной площади паза обмоточным проводом

$$k_3 = \frac{2 \cdot d_{из}^2 \cdot u_n \cdot n_{эл} \cdot w_s}{S_{св} - S_{из} - S_{\kappa}}, \quad (3.17)$$

где $d_{из}$ – диаметр изолированного элементарного проводника, м;

u_n – число элементарных пазов в одном реальном;

$n_{эл}$ – число элементарных проводников в одном реальном;

w_s – число витков в секции.

Полученное значение коэффициента заполнения свободной площади паза обмоточным проводом должно находиться в пределах 0,68...0,75.

Значение коэффициента k_z более 0,75 применять не следует, так как при укладке обмотки якоря в пазы потребуются значительные механические воздействия, способные повредить изоляцию. С целью снижения коэффициента заполнения паза можно повысить магнитную индукцию в зубце якоря до предельных значений, уменьшить число витков в секции (снизить линейную токовую нагрузку) и (или) уменьшить число пазов якоря.

При малых значениях коэффициента заполнения для уплотнения обмотки в пазу потребуются утолщённые клинья. Повышать коэффициент заполнения паза целесообразно за счёт уменьшения его высоты; можно снизить магнитную индукцию в зубце или плотность тока в обмотке (выбрать провод большего поперечного сечения).

После окончательного решения вопроса о размещении обмотки якоря в пазах, в связи с округлением размеров паза r_1, r_2 и h_1 , необходимо уточнить ширину зубца ротора в двух сечениях:

$$\begin{aligned} b_{z1}'' &= \frac{\pi[D - 2 \cdot h_{m1} - 2 \cdot r_1]}{z_2} - 2 \cdot r_1; \\ b_{z2}'' &= \frac{\pi(D - 2h_{n2} + 2 \cdot r_2)}{z_2} - 2 \cdot r_2. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Из полученных уточнённых значений ширины зубца в двух сечениях определяют максимальное ($b_{z\max}''$) и минимальное ($b_{z\min}''$) значение. Расчётная ширина зубца

$$b_{zp}'' = \frac{b_{z\max}'' + 2b_{z\min}''}{3}. \quad (3.19)$$

Среднее значение ширины зубца:

$$b_{zcp}'' = \frac{b_{z\max}'' + b_{z\min}''}{2}. \quad (3.20)$$

Средняя длина лобовой части обмотки, м:

- при $2p = 2$

$$l_n \approx 0,9 \cdot \tau; \quad (3.21)$$

- при $2p = 4$

$$l_n \approx (1,2 \dots 1,3) \cdot \tau. \quad (3.22)$$

Длина вылета лобовой части обмотки якоря, м

$$l_{\text{ввл}} \approx (0,12 + 0,14 \cdot p) \cdot b_{cp} + 0,0075, \quad (3.23)$$

где $b_{cp} = \frac{\pi \cdot (D - h_n)}{z_2} \cdot y_{1n}$ – средняя ширина секции обмотки якоря, м.

Средняя длина витка обмотки якоря, м

$$l_{cp} = 2(l_2 + l_n). \quad (3.24)$$

Сопротивление обмотки якоря при температуре 20°C , Ом

$$r_a = \rho_{20} \cdot \frac{l_{cp} \cdot w_2}{(2a)^2 \cdot q_a}. \quad (3.25)$$

Таблица 3.8- Удельное электрическое сопротивление материала проводников обмотки

Тип обмотки	Удельное электрическое сопротивление. Ом·м, при температуре, °C		
	20	75	115
Обмотки из медных проводников	$\frac{1}{57} 10^{-6}$	$\frac{1}{47} 10^{-6}$	$\frac{1}{41} 10^{-6}$
Коэффициент $k_m = \frac{\rho_\theta}{\rho_{20}}$	1	~1,22	~1,4

Сопротивление обмотки якоря при расчётной температуре, Ом

$$r_{a\theta} = \rho_\theta \cdot \frac{l_{cp} \cdot w_2}{(2a)^2 \cdot q_a}. \quad (3.26)$$

Масса материала обмотки якоря, кг

$$m_a = 8900 \cdot l_{cp} \cdot w_2 \cdot q_a. \quad (3.27)$$

3.3 Расчет размеров прямоугольных пазов и обмотки якоря

В машинах постоянного тока с высотой оси вращения $h \geq 225$ мм обмотка якоря выполняется из изолированного обмоточного провода прямоугольного поперечного сечения и укладывается в открытые прямоугольные пазы. При изоляции класса нагревостойкости B применяют прямоугольные провода марки $ПЭТВП$, класса F – провода марки $ПЭТП-155$, класса H – провода $ПЭТП-200$ или $ПСДКТ$.

Примерное значение высоты паза выбирают по рисунку 3.5.

При диаметрах якоря до 500 мм магнитопровод насаживают непосредственно на вал. Внутренний диаметр магнитопровода якоря определяют по формуле (3.7) или принимают равным $D_o \approx 0,3 \cdot D$. Предварительное значение высоты спинки якоря вычисляют по формуле (3.8).

В машинах постоянного тока с диаметром якоря свыше 200 мм с целью улучшения охлаждения, снижения массы и динамического момента инерции якоря выполняют в коллекторе и в магнитопроводе якоря круглые аксиальные вентиляционные каналы. В машинах с высотой оси вращения $h = 225$ мм и $h = 250$ мм выполняют один ряд каналов $m_k = 1$ диаметром (d_k) от 15 до 22 мм при числе каналов (n_k) от 17 до 19. При большей высоте оси вращения выполняют два ряда каналов ($m_k = 2$) диаметром от 18 до 32 мм и общем числе каналов от 22 до 30. Каналы располагают в шахматном порядке.

Предварительное значение магнитной индукции в спинке якоря определяют с учётом ослабления сечения спинки осевыми каналами:

$$B'_j = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot \left(h'_j - \frac{2}{3} \cdot m_k \cdot d_k \right) \cdot l_2 \cdot k_c}, \quad (3.28)$$

где m_k – число рядов каналов;

d_k – диаметр каналов.

Полученное значение магнитной индукции B'_j не должно превышать допустимых значений, представленных в таблице 3.7. Если магнитная индукция в спинке якоря превышает допустимое значение, то следует уменьшить высоту паза; возможно, завышена величина диаметра осевых каналов.

Ширина зубца в минимальном сечении (у дна паза), предварительно, определяется максимальным допустимым значением магнитной индукции в зубце, которое выбирается по таблице 3.9:

$$b_{z \min} = \frac{B_\delta \cdot t_z \cdot l_\delta}{B_{z \max} \cdot l_2 \cdot k_c}. \quad (3.29)$$

Предварительное значение ширины паза, м:

$$b'_{n2} = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot h'_{n2})}{z_2} - b_{z\min}. \quad (3.30)$$

По выбранному значению высоты паза и расчётному значению ширины паза определяют допустимые размеры проводников с изоляцией.

Таблица 3.9 – Предельные допустимые значения магнитной индукции в зубцах якоря (пазы прямоугольные)

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция $B_{z\max}$, Тл, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	25 и ниже
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,9 – 2,1	2,0 – 2,2	2,1 – 2,3	2,2 – 2,4
IP44, IC0141	1,6 – 1,8	1,7 – 1,9	1,8 – 2,0	1,9 – 2,1
IP44, IC0041	1,5 – 1,7	1,6 – 1,8	1,7 – 1,9	1,8 – 2,0

Допустимая ширина провода с витковой изоляцией, м:

$$a'_u = \frac{b'_{n2} - b_{uz} - b_c}{u_n}, \quad (3.31)$$

где b_{uz} – двухсторонняя толщина изоляции по ширине паза, м. Определяется по таблице 3.2;

b_c – припуск на сборку сердечника по ширине паза, включая изменение ширины паза от скоса пазов, м.

Допустимая высота провода с витковой изоляцией, м:

$$b'_u = \frac{h'_{n2} - h_{uz} - h_{\bar{o}} - h_c}{2 \cdot w_s \cdot n_{эл}}, \quad (3.32)$$

где h_{uz} – общая толщина изоляции по высоте паза, м. Определяется по таблице 3.2;

$h_{\bar{o}}$ – высота бандажной канавки, м;

h_c – припуск на сборку сердечника по высоте паза, м;

$n_{эл}$ – число элементарных проводников. Предварительно принимают $n_{эл} = 1$, если число витков в секции $w_s = 2$, $n_{эл} = 2$, если $w_s = 1$.

Высоту бандажной канавки принимают равной 2 мм при высоте оси вращения $h = 225$ мм, 3 мм при высоте оси вращения $h = 250$ и 280 мм, 3,5 мм при высоте оси вращения $h = 315$ мм.

Припуск на сборку сердечника определяется по таблице 3.4.

Для уменьшения влияния эффекта вытеснения тока в проводниках обмотки якоря, по которым протекает переменный ток частотой $f_2 = p \cdot \frac{n}{60}$, высота проводника b не должна превышать 4 мм при частоте $f_2 \geq 100$ Гц, 7 мм при $f_2 = 50$ Гц, 10 мм при частоте $f_2 \leq 25$ Гц. Если расчётная высота проводника $b'_u - \delta_{из}$ оказывается больше допустимого значения, то проводник подразделяют по большей стороне на два элементарных ($n_{эл} = 2$).

Размеры обмоточного провода (a_z, b_z, a_u, b_u), двухстороннюю толщину изоляции обмоточного провода ($\delta_{из}$) и сечение элементарного проводника ($q_{эл}$) выбирают по приложению В.

Выбрав стандартные размеры обмоточного провода, определяют сечение проводников параллельной ветви обмотки якоря, m^2 :

$$q_a = n_{эл} \cdot q_{эл}, \quad (3.33)$$

и уточняют плотность тока в обмотке якоря по формуле (3.4).

Уточнённое значение произведения

$$AJ = A \cdot J_2 \quad (3.34)$$

не должно превышать предельных значений, представленных на рисунке 3.3. Если произведение AJ превышает допустимое значение, то необходимо увеличить площадь паза и выбрать обмоточный провод большего поперечного сечения.

После выбора размеров обмоточного провода уточняют размеры паза:

- уточнённая ширина паза в штампе

$$b_{n2} = u_n \cdot a_u + b_{из} + b_c; \quad (3.35)$$

- уточнённая высота паза в штампе

$$h_{n2} = 2 \cdot w_s \cdot n_{эл} \cdot b_u + h_{из} + h_c + h_{\phi}. \quad (3.36)$$

Размеры паза округляют до десятых долей миллиметра.

После уточнения размеров паза уточняют ширину зубца в минимальном сечении (у дна паза) и высоту ярма, по значениям которых определяют магнитную индукцию в зубце и в ярме. Полученные значения магнитной индукции не должны превышать предельных допустимых значений.

Среднее зубцовое деление якоря, м

$$t_{z2cp} = \frac{\pi \cdot (D - h_{n2})}{z_2}. \quad (3.37)$$

Средняя ширина секции обмотки якоря, м

$$b_{cp} = y_{1n} \cdot t_{z2cp}. \quad (3.38)$$

Средняя длина лобовой части секции, м

$$l_l \approx 1,2 \cdot b_{cp} + h_{n2} + 0,04. \quad (3.39)$$

Длина вылета лобовой части обмотки якоря, м

$$l_{\text{выл}} \approx 0,3 \cdot b_{cp} + \frac{h_{n2}}{2} + 0,02. \quad (3.40)$$

Среднюю длину витка, активные сопротивления и массу обмотки якоря вычисляют по формулам (3.24) – (3.27).

4 Выбор воздушного зазора

Воздушный зазор в машине постоянного тока должен удовлетворять противоречивым требованиям. При увеличении воздушного зазора возрастает магнитное напряжение зазора и суммарная намагничивающая сила, необходимая для создания номинального магнитного потока. Возрастают потери мощности в обмотке возбуждения и площадь поперечного сечения катушки. Следовательно, могут возникнуть проблемы с размещением обмоток в междуполусном пространстве. В тоже время, при увеличении воздушного зазора снижается размагничивающее действие поперечного поля якоря, улучшается устойчивость скоростной характеристики.

В машинах без компенсационной обмотки для уменьшения размагничивающего действия поперечного поля якоря и понижения уровня магнитного шума машин воздушный зазор выполняют эксцентричным (центры радиусов якоря и полюсной дуги не совпадают) или с приподнятыми краями. По оси полюса воздушный зазор выполняется меньше, а у краев полюса – больше. Расчетный воздушный зазор может быть выбран в зависимости от диаметра якоря по рисунку 4.1 и определяется по формуле

$$\delta = 0.75 \cdot \delta' + 0.25 \cdot \delta'', \quad (4.1)$$

где δ' - воздушный зазор по оси полюса;

δ'' - воздушный зазор у края полюса.

Воздушный зазор по оси полюса может быть принят равным $\delta' = \frac{2}{3}\delta$, а у края полюса - $\delta'' = 2 \cdot \delta$.

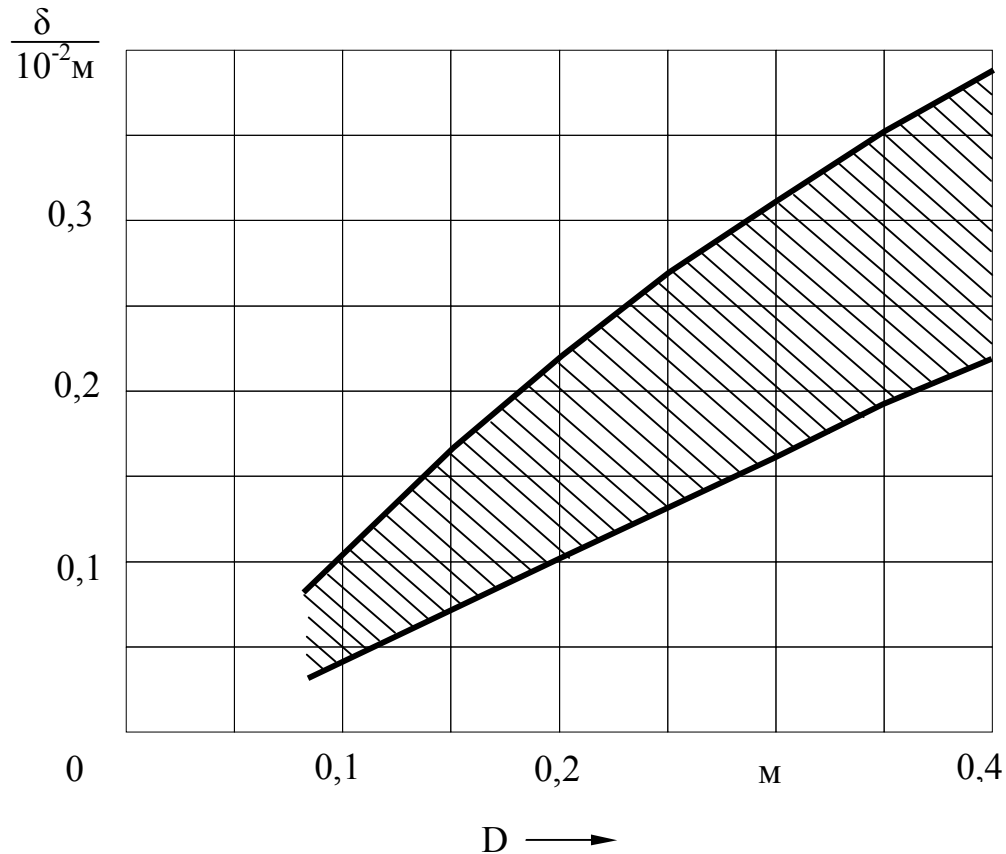


Рисунок 4.1 – Зависимость величины воздушного зазора от диаметра якоря

В машинах с компенсационной обмоткой воздушный зазор выполняется равномерным и меньшим по величине.

5 Определение размеров полюсов и станины

Полюсы машины постоянного тока выполняются шихтованными из листовой стали 3 или из листовой электротехнической стали 3411 толщиной 1 мм. Применение электротехнической стали марки 3411 является более предпочтительным, так как она, являясь анизотропной сталью, обладает различными свойствами вдоль прокатки и поперек прокатки. Направление прокатки совпадает с направлением основного потока, а направление поперек прокатки – с направлением поперечного поля якоря в полюсном наконечнике. Это благоприятно сказывается на решении проблемы реакции поперечного поля якоря.

Полюсы опрессовывают с помощью заклепок. Общее число заклепок должно быть не менее четырех, диаметр заклепки должен быть не менее четырех миллиметров, а общая площадь их поперечного сечения должна составлять не менее 2% от площади боковой поверхности полюсного сердечника.

Полюсы крепятся к станине с помощью болтов. Общее сечение болтов и выбор их числа на один полюс производят на основании результатов механического расчета.

Определяя размеры главного полюса, предусматривают зазор между полюсным сердечником и станиной, который заполняется стальными прокладками, имеющими П-образную форму. В условиях производства машины, изменяя число и толщину прокладок, можно регулировать величину магнитного потока в воздушном зазоре при неизменном (номинальном) значении намагничивающей силы обмотки возбуждения.

Длина полюсного наконечника и длина полюсного сердечника принимаются равными конструктивной длине магнитопровода якоря (в машинах без радиальных каналов в магнитопровode якоря)

$$l_p = l_2. \quad (5.1)$$

Расчетная ширина полюсного наконечника определяется по формуле

$$b'_p = \alpha_\delta \cdot \tau. \quad (5.2)$$

При неравномерном воздушном зазоре конструктивная ширина полюсного наконечника принимается равной расчетному значению

$$b_p = b'_p. \quad (5.3)$$

Магнитная индукция в полюсном сердечнике B_n может быть выбрана, предварительно, в пределах от 1,6 Тл до 1,7 Тл, если полюс выполняется из электротехнической стали марки 3411, или в пределах от 1,4 Тл до 1,5 Тл, если полюс выполняется из листовой стали 3.


$$b_n = \frac{\Phi_\delta \cdot \sigma}{B_n \cdot l_p \cdot k_{cp}}, \quad (5.4)$$

Величина выступа полюсного наконечника

$$b_{nn} = (0,1 - 0,2) \cdot b_n. \quad (5.5)$$

$$h_{nn} = \frac{(b_p - b_n) \cdot B_\delta \cdot l_\delta}{2 \cdot 0,85 \cdot B_n \cdot l_p \cdot k_{cp}}. \quad (5.6)$$

51

Длина станины зависит от исполнения подшипниковых щитов, являются ли они глубокими, мелкими или плоскими. Минимальная длина станины должна быть такой, чтобы станина перекрывала лобовые части обмотки возбуждения и добавочных полюсов.

$$l_c = l_p + 0,4 \cdot D. \quad (5.7)$$

Магнитная индукция в станине, предварительно, может быть выбрана в пределах $B_c = 1,2 - 1,3 \text{ Тл}$. Высота станины определяется по формуле

$$h_c = \frac{\Phi_\delta \cdot \sigma}{2 \cdot B_c \cdot l_c \cdot k_{cc}}, \quad (5.8)$$

где k_{cc} – коэффициент заполнения станины сталью (для шихтованных станин). Если станина выполняется массивной, то коэффициент заполнения станины сталью равен единице ($k_{cc} = 1$).

Так как длина станины больше длины полюсного сердечника, то высоту станины проверяют по допустимому значению магнитной индукции в месте перехода магнитного потока из полюсного сердечника в станину

$$B_{nc} = \frac{\Phi_\delta \cdot \sigma}{2 \cdot h_c \cdot k_{cc} \cdot (b_n + l_n)}. \quad (5.9)$$

Полученное значение магнитной индукции не должно превышать значения $1,7 \text{ Тл}$.

Наружный диаметр станины, м

$$D_n = 2 \cdot h - (8 - 10) \cdot 10^{-3}. \quad (5.10)$$

Внутренний диаметр станины

$$D_{вн} = D_n - 2 \cdot h_c. \quad (5.11)$$

Высота главного полюса, м

$$h_z = \frac{D_{вн} - D}{2} - 2 \cdot \delta. \quad (5.12)$$

Величина $2 \cdot \delta$ в формуле (5.12) учитывает, кроме воздушного зазора, место между полюсным сердечником и станиной для размещения стальных прокладок, предназначенных для регулирования воздушного зазора.

6 Расчёт магнитной цепи

Расчёт магнитной цепи машины постоянного тока производят для режима холостого хода с целью получения характеристики холостого хода и переходной характеристики. Характеристика холостого хода используется при расчётах рабочих характеристик двигателей. С помощью переходной характеристики определяют размагничивающее действие поперечного поля якоря.

Магнитную цепь машины постоянного тока принято рассматривать состоящей из ряда последовательно соединённых условно однородных участков: воздушного зазора между главными полюсами и внешней поверхностью якоря, зубцов якоря, ярма якоря, зубцов полюсных наконечников (в машинах с компенсационной обмоткой), сердечника главных полюсов, технологического зазора между полюсным сердечником и станиной и станины. Считают, что в пределах каждого из участков магнитная индукция имеет одно наиболее характерное направление.

Магнитная цепь машины считается симметричной, поэтому расчёт магнитной цепи производится на один полюс (на один воздушный зазор).

Для выполнения расчётов магнитной цепи машины необходимо знать размеры участков магнитной цепи и магнитный поток (или магнитную индукцию) в воздушном зазоре.

Расчёт магнитной цепи производят для ряда значений ЭДС обмотки якоря:

$$0,5E_n, \quad 0,75E_n, \quad 0,9E_n, \quad E_n, \quad 1,1E_n, \quad 1,15E_n.$$

Номинальную ЭДС обмотки якоря можно определить по расчётной мощности и номинальному току якоря:

$$E_n = \frac{P'}{I_{2n}}. \quad (6.1)$$

По значению ЭДС вычисляют соответствующий магнитный поток и магнитную индукцию в воздушном зазоре:

$$\Phi_\delta = \frac{60 \cdot a \cdot E}{p \cdot N \cdot n_{ном}}, \quad (6.2)$$

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{S_\delta}, \quad (6.3)$$

где

$$S_\delta = \alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta. \quad (6.4)$$

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta \cdot k_{\delta} = 0,8 B_{\delta} \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^6, \quad (6.5)$$

где k_{δ} - коэффициент воздушного зазора, учитывающий влияние зубцов якоря ($k_{\delta 2}$) и бандажных канавок ($k_{\delta k}$) для открытых пазов якоря. Если пазы на якоре выполняются полузакрытыми, то $k_{\delta k} = 1$.

$$k_{\delta} = k_{\delta 2} \cdot k_{\delta k}, \quad (6.6)$$

где

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{\text{ш}}}{t_z - b_{\text{ш}} + 10\delta}. \quad (6.7)$$

При открытых прямоугольных пазах в формуле (6.7) вместо $b_{\text{ш}}$, для вычисления $k_{\delta 2}$, используют ширину паза.

При бандажах из немагнитного материала

$$k_{\delta k} = 1 + \frac{b_{\delta} \cdot h_{\delta}}{l_2 \cdot (\delta + h_{\delta}) - b_{\delta} \cdot h_{\delta}}, \quad (6.8)$$

а при бандажах из стальной проволоки

$$k_{\delta k} = 1 + \frac{b_{\delta} \cdot (h_{\delta} - 0,8 \cdot d)}{l_2 \cdot (\delta + h_{\delta} - 0,8 \cdot d) - b_{\delta} \cdot (h_{\delta} - 0,8 \cdot d)}, \quad (6.9)$$

где b_{δ} - общая ширина бандажных канавок на якоре;

h_{δ} - глубина бандажных канавок;

d - диаметр проволоочного бандажа.

Предварительно, до проведения механического расчёта бандажей, можно принять $b_{\delta} \approx 0,3 \cdot l_2$, $h_{\delta} \approx 2 - 3,5 \text{ мм}$, а $d \approx 0,5 h_{\delta}$.

Выполняя вычисления магнитного напряжения зубцов якоря, необходимо учитывать конфигурацию зубцов (пазов якоря), а при значении магнитной индукции в расчётном сечении зуба более $1,8 \text{ Тл}$ - отвлечение магнитного потока в паз.

Если пазы на якоре выполняются прямоугольными открытыми, то зубцы имеют трапециевидальную форму. Магнитная индукция по высоте зуба непрерывно изменяется. Магнитное напряжение при такой конфигурации зуба может быть найдено в результате следующих вычислений.

Вычисляются зубцовые деления по внешнему диаметру якоря (максимальное), по середине высоты паза якоря (среднее) и у дна паза (минимальное):

$$t_{z \max} = \frac{\pi \cdot D}{z_2}; \quad (6.10)$$

$$t_{z \text{cp}} = \frac{\pi \cdot (D - h_{n2})}{z_2}; \quad (6.11)$$

$$t_{z \min} = \frac{\pi \cdot (D - 2h_{n2})}{z_2}. \quad (6.12)$$

По значению зубцовых делений вычисляют максимальную, среднюю и минимальную ширину зубца:

$$b_{z \max} = t_{z \max} - b_{n2}; \quad (6.13)$$

$$b_{z \text{cp}} = t_{z \text{cp}} - b_{n2}; \quad (6.14)$$

$$b_{z \min} = t_{z \min} - b_{n2}. \quad (6.15)$$

Определяется магнитная индукция в трёх сечениях зубца: максимальном ($B_{z \min}$), среднем ($B_{z \text{cp}}$) и минимальном ($B_{z \max}$):

$$B_{z \min} = k_{z1} \cdot B_{\delta}, \quad (6.16)$$

$$B_{z \text{cp}} = k_{z2} \cdot B_{\delta}; \quad (6.17)$$

$$B_{z \max} = k_{z3} \cdot B_{\delta}; \quad (6.18)$$

где

$$k_{z1} = \frac{t_{z \max} \cdot l_{\delta}}{b_{z \max} \cdot l_2 \cdot k_c}; \quad (6.19)$$

$$k_{z2} = \frac{t_{z \max} \cdot l_{\delta}}{b_{z \text{cp}} \cdot l_2 \cdot k_c}; \quad (6.20)$$

$$k_{z3} = \frac{t_{z \max} \cdot l_{\delta}}{b_{z \min} \cdot l_2 \cdot k_c}. \quad (6.21)$$

Для трёх значений магнитной индукции $B_{z\ min}$, $B_{z\ ср}$ и $B_{z\ max}$ по кривым намагничивания (Приложение Г) для выбранной электротехнической стали, определяют три значения напряжённости магнитного поля $H_{z\ min}$, $H_{z\ ср}$ и $H_{z\ max}$.

Если расчётное значение магнитной индукции, рассчитанное по формулам (6.16) – (6.18), окажется выше $1,8\ Тл$, то для этого значения магнитной индукции соответствующую напряжённость магнитного поля определяют с учётом ответвления магнитного потока в паз, используя кривые намагничивания Приложения Г, представленные на рисунках Г.1 – Г.4.

Для учёта ответвления магнитного потока в паз рассчитывают коэффициенты, определяющие отношение площадей поперечных сечений паза и зубца на внешней поверхности якоря, в среднем сечении зубца и в минимальном сечении зубца:

$$k_{nx1} = \frac{b_{n2} \cdot l_{\delta}}{b_{z\ max} \cdot l_2 \cdot k_c}; \quad (6.22)$$

$$k_{nx2} = \frac{b_{n2} \cdot l_{\delta}}{b_{z\ ср} \cdot l_2 \cdot k_c}; \quad (6.23)$$

$$k_{nx3} = \frac{b_{n2} \cdot l_{\delta}}{b_{z\ min} \cdot l_2 \cdot k_c}. \quad (6.24)$$

По трём значениям напряжённости магнитного поля находят расчётное значение напряжённости магнитного поля в зубце:

$$H_{zp} = \frac{1}{6} (H_{z\ min} + 4H_{z\ ср} + H_{z\ max}). \quad (6.25)$$

Магнитное напряжение зубца якоря

$$F_z = H_{zp} \cdot L_z, \quad (6.26)$$

где L_z - длина силовой линии магнитного поля в зубце якоря, м.

Для трапецеидальных зубцов якоря $L_z = h_{n2}$.

При овальной форме паза ширина зубца на его большей высоте остаётся практически неизменной. Магнитное напряжение зубца определяется магнитной индукцией в постоянном сечении зубца. Для вычисления магнитной индукции находят эффективное сечение зубцов якоря на одном полюсном делении:

$$S_z = \frac{\alpha_{\delta} \cdot z_2 \cdot b_{zp} \cdot l_2 \cdot k_c}{2p}. \quad (6.27)$$

Магнитная индукция в зубце якоря

$$B_z = \frac{\Phi_\delta}{S_z}. \quad (6.28)$$

По значению магнитной индукции в зубце по приложению Г находят расчётное значение напряжённости магнитного поля H_{zp} . Для учёта ответвления магнитного потока в паз вычисляют коэффициент

$$k_{nx} = \left\{ \pi \cdot \frac{(3D - 4h_{n2})}{3 \cdot z_2} - b_{zcp} \right\} \frac{l_\delta}{b_{zcp} \cdot l_2 \cdot k_c}. \quad (6.29)$$

Расчётная длина силовой линии магнитного поля в зубце якоря при пазах овальной формы

$$L_z = h_{n2} - 0,2 \cdot r_2. \quad (6.30)$$

Магнитное напряжение зоны зубцов определяют по формуле (6.26).

Магнитная индукция в ярме якоря

$$B_j = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot S_j}, \quad (6.31)$$

где $S_j = h'_j \cdot l_2 \cdot k_c$ - сечение ярма якоря;

$h'_j = h_j - \frac{2}{3} d_\kappa \cdot m_\kappa$ - расчётная высота ярма якоря;

$h_j = 0,5 \cdot (D - 2h_{n2} - D_o)$ - высота ярма якоря.

Если осевые каналы в магнитопроводе якоря не выполняются, то $h'_j = h_j$.

По значению магнитной индукции в ярме якоря определяют напряжённость магнитного поля H_j .

Магнитное напряжение ярма якоря

$$F_j = H_j \cdot L_j, \quad (6.32)$$

где $L_j = \frac{\pi \cdot (D_o + h_j)}{4p} + \frac{h_j}{2}$ - длина силовой линии поля в ярме якоря.

Эффективное поперечное сечение главного полюса

$$S_n = b_n \cdot l_p \cdot k_{cp}. \quad (6.33)$$

Магнитная индукция в полюсном сердечнике

$$B_n = \frac{\Phi_\delta \cdot \sigma}{S_n}. \quad (6.34)$$

По значению магнитной индукции в полюсном сердечнике определяют напряжённость магнитного поля H_{zn} и вычисляют магнитное напряжение:

$$F_{zn} = H_{zn} \cdot L_{zn}, \quad (6.35)$$

где $L_{zn} = h_n$ - длина силовой линии магнитного поля в полюсном сердечнике.

Магнитная индукция в технологическом зазоре между полюсным сердечником и станиной принимается равной магнитной индукции в полюсном сердечнике ($B_{\delta nc} = B_n$). Магнитное напряжение технологического зазора

$$F_{\delta nc} = \frac{B_{\delta nc}}{\mu_o} \cdot L_{\delta nc}, \quad (6.36)$$

где $L_{\delta nc}$ - длина силовой линии магнитного поля в технологическом зазоре.

$$L_{\delta nc} = (1 + 2 \cdot l_\delta) \cdot 10^{-4}. \quad (6.37)$$

В формуле (6.37) расчётная длина машины l_δ подставляется в метрах.

Для вычисления магнитного напряжения в станине определяют магнитную индукцию

$$B_c = \frac{\Phi_\delta \cdot \sigma}{2 \cdot S_c}, \quad (6.38)$$

где $S_c = h_c \cdot l_c \cdot k_{cc}$ - эффективное сечение станины.

Магнитное напряжение станины

$$F_c = H_c \cdot L_c, \quad (6.39)$$

где $L_c = \frac{\pi \cdot (D_n - h_c)}{4p} + \frac{h_c}{2}$ - длина силовой линии магнитного поля в станине.

Суммарное магнитное напряжение всех участков магнитной цепи

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_z + F_j + F_{zn} + F_{\delta nc} + F_c. \quad (6.40)$$

Магнитное напряжение переходного слоя

$$F_{\delta za} = F_{\delta} + F_z + F_j. \quad (6.41)$$

Результаты расчёта магнитной цепи целесообразно свести в таблицу (смотреть таблицу 6.1).

Таблица 6.1 – Результаты расчёта магнитной цепи

Расчётная величина	$0,5E_H$	$0,75E_H$	$0,9E_H$	E_H	$1,1E_H$	$1,15E_H$
1	2	3	4	5	6	7
$\Phi_{\delta} = \frac{60 \cdot a \cdot E}{p \cdot N \cdot n_{ном}}$ $B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{S_{\delta}}$ $F_{\delta} = 0,8 B_{\delta} \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^6$ $B_{z \min} = k_{z1} \cdot B_{\delta}$ $B_{z \text{cp}} = k_{z2} \cdot B_{\delta}$ $B_{z \max} = k_{z3} \cdot B_{\delta}$ $H_{z \min}$ $H_{z \text{cp}}$ $H_{z \max}$ $\frac{1}{6} (H_{z \min} + 4H_{z \text{cp}} + H_{z \max})$ <p>Для зубцов с параллельными стенками</p> $B_z = \frac{\Phi_{\delta}}{S_z}$ H_{zp} $F_z = H_{zp} \cdot L_z$ $B_j = \frac{\Phi_{\delta}}{2 \cdot S_j}$						

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7
H_j $F_j = H_j \cdot L_j$ $B_n = \frac{\Phi_\delta \cdot \sigma}{S_n}$ H_{zn} $F_{zn} = H_{zn} \cdot L_{zn}$ $F_{\delta nc} = \frac{B_{\delta nc} \cdot L_{\delta nc}}{\mu_o}$ $B_c = \frac{\Phi_\delta \cdot \sigma}{2 \cdot S_c}$ H_c $F_c = H_c \cdot L_c$ $F_\Sigma = F_\delta + F_z +$ $+ F_j + F_{zn} + F_{\delta nc} + F_c$ $F_{\delta zj} = F_\delta + F_z + F_j$						

По результатам расчёта магнитной цепи строится переходная характеристика и характеристика холостого хода.

7 Проектирование обмоток возбуждения

7.1 Определение МДС обмотки возбуждения в режиме номинальной нагрузки

В режиме нагрузки двигателя обмотка возбуждения должна создавать МДС (F_Σ), соответствующую номинальному магнитному потоку в воздушном зазоре машины, а также компенсировать продольную и действие поперечной составляющей поля якоря.

Продольная составляющая поля якоря F_d возникает при смещении щёток с геометрической нейтрали. Значение продольной составляющей поля якоря зависит от размера дуги (x), на которую щётки смещены с нейтрали и от линейной токовой нагрузки якоря. Значение продольной составляющей поля якоря в расчёте на один полюс

$$F_d = A \cdot x. \quad (7.1)$$

Направление действия этой МДС зависит от направления смещения щёток по отношению к направлению вращения якоря. В реверсивных двигателях щётки устанавливают на геометрической нейтрали ($x = 0$). В этом случае продольная составляющая поля якоря не возникает ($F_d = 0$).

Поперечная составляющая поля якоря размагничивает машину (вызывает снижение основного магнитного потока машины). Размагничивающее действие поперечного поля якоря F_{qd} определяется по переходной характеристике.

В машинах параллельного и независимого возбуждения без компенсационной обмотки на главных полюсах, в целях повышения устойчивости работы двигателя и частичной компенсации действия поперечного поля якоря на поле главных полюсов (реакция якоря), выполняют стабилизирующую обмотку. Эта обмотка создаёт в машине МДС, направленную согласно с МДС обмотки возбуждения.

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на один полюс

$$F_{\text{вн}} = F_{\Sigma} + F_{qd} \pm F_d - F_c, \quad (7.2)$$

где F_c – МДС стабилизирующей обмотки.

Если в машине стабилизирующая обмотка не выполняется, то принимают $F_c = 0$.

7.2 Определение размагничивающего действия поперечного поля якоря

В машине постоянного тока при нагрузке под действием поперечного поля якоря магнитное поле в воздушном зазоре искажается: под одним краем полюса магнитная индукция возрастает, а под другим – снижается. Таким образом, под одним краем главного полюса наблюдается возрастание магнитного потока, а под другим краем полюса магнитный поток уменьшается. Из-за насыщения магнитной цепи возрастание магнитного потока происходит в меньшей степени, чем его снижение. Это приводит к тому, что основной магнитный поток в воздушном зазоре снижается.

Расчёт размагничивающего действия поперечного поля якоря (F_{qd}), при проектировании машины постоянного тока, производят с помощью переходной характеристики. Переходная характеристика представляет собой зависимость магнитной индукции в воздушном зазоре B_{δ} от магнитного напряжения переходного слоя $F_{\delta \text{ за}}$ ($F_{\delta \text{ за}} = F_{\delta} + F_z + F_j$). Переходную характеристику строят по результатам расчёта магнитной цепи. Переходная характеристика и построения, необходимые для определения размагничивающего действия поперечного поля якоря, представлены на рисунке 7.1.

Для определения размагничивающего действия поперечного поля якоря на переходной характеристике определяют положение точки, соответствующей

номинальному значению магнитной индукции в воздушном зазоре машины в режиме номинальной нагрузки (точка a), и соответствующую этой точке абсциссу (точка b). Влево и вправо от точки b откладывают отрезки численно равные $\frac{A \cdot b_p}{2}$ (где b_p - ширина полюсной дуги). На оси абсцисс получают точки e и h , для которых по переходной характеристике определяют значения магнитной индукции ($B_{\delta \min}$ и $B_{\delta \max}$). Кривая daf характеризует распределение магнитной индукции в воздушном зазоре в пределах полюсной дуги при нагрузке машины.

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

$$B_{\delta \text{cp}} = \frac{1}{6} \cdot (B_{\delta \min} + 4 \cdot B_{\delta \text{н}} + B_{\delta \max}). \quad (7.3)$$

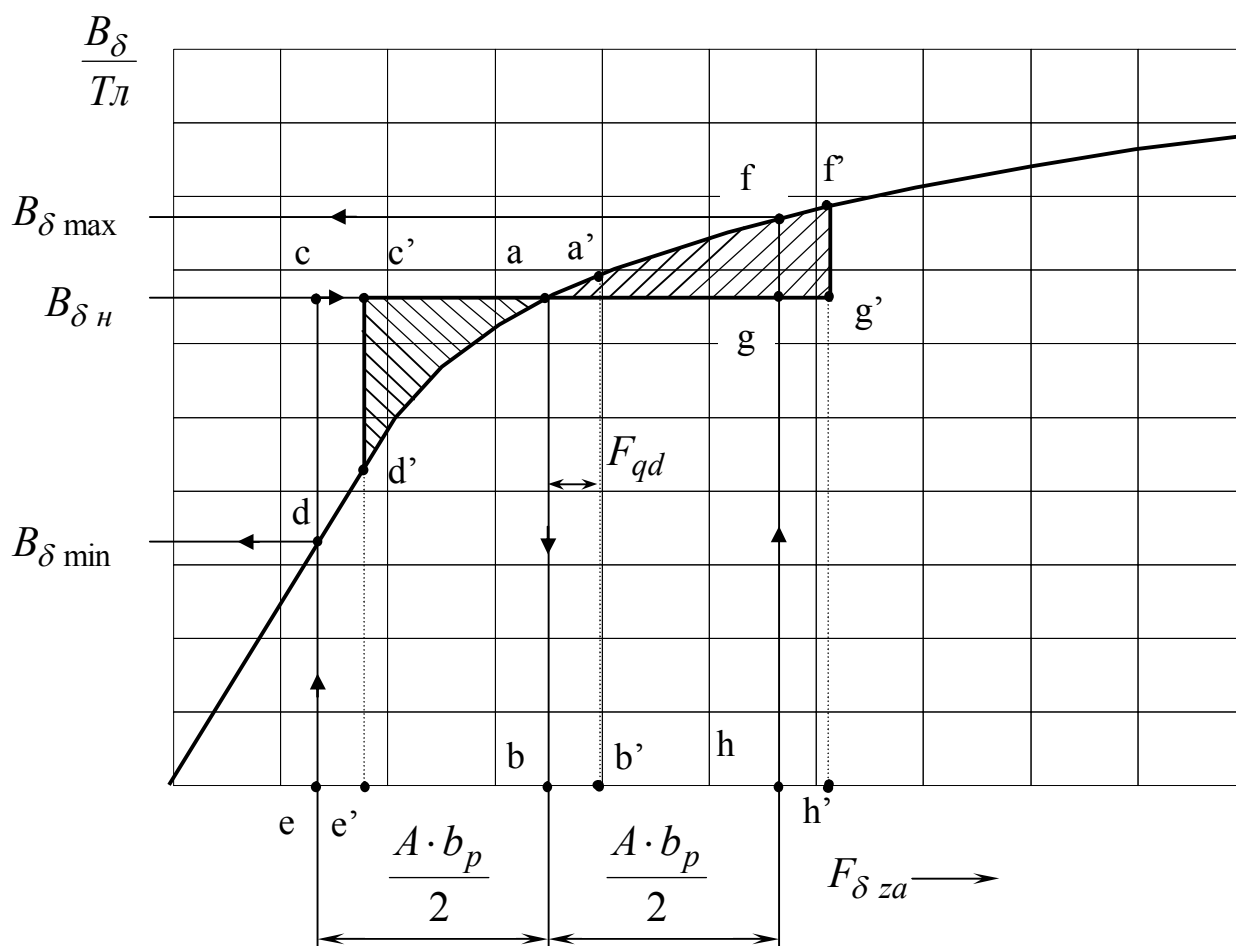


Рисунок 7.1 – Переходная характеристика машины постоянного тока

Полученное среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре будет меньше магнитной индукции $B_{\delta \text{н}}$ из-за размагничивающего действия поперечного поля якоря.

Для определения размагничивающего действия поперечного поля якоря необходимо ось ab криволинейного четырёхугольника $afheda$ сместить вправо настолько, чтобы площади фигур $a d' c' a$ и $a f' g' a$ оказались равными и точка a заняла положение a' . В этом случае разность абсцисс точек a' и a будет равна размагничивающему действию поперечного поля якоря F_{qd} . Ордината точки a' определит значение магнитной индукции в воздушном зазоре машины в режиме холостого хода.

Определить (предварительно) положение точки a' можно, изменив ординату точки a на величину ΔB :

$$\Delta B = B_{\delta n} - B_{\delta cp}. \quad (7.4)$$

Для полученного на переходной характеристике положения точки a' необходимо выполнить построения, позволяющие вычислить среднее значение магнитной индукции. В случае удачного определения положения точки a' должно выполняться условие

$$B_{\delta cp} \approx B_{\delta n}. \quad (7.5)$$

Если это условие не выполняется, то в положение точки a' вносят корректировку.

7.3 Проектирование стабилизирующей обмотки

Конструктивно стабилизирующая обмотка располагается на главных полюсах либо у полюсного наконечника, либо возле станины, а в машинах с секционированной обмоткой возбуждения её можно расположить между секциями обмотки и использовать в качестве дистанционной распорки.

Стабилизирующая обмотка должна компенсировать размагничивающее действие поперечного поля якоря, поэтому в электрической схеме машины она включается последовательно в цепь якоря (обтекается током якоря).

Число витков стабилизирующей обмотки на один полюс

$$w'_c = \frac{F_{qd}}{I_{2n}} \cdot a_c, \quad (7.6)$$

где a_c - число параллельных ветвей стабилизирующей обмотки; принимается равным числу параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов.

Полученное значение числа витков стабилизирующей обмотки w'_c округляют до ближайшего целого числа w_c .

Магнитодвижущая сила стабилизирующей обмотки

$$F_c = w_c \cdot I_2. \quad (7.7)$$

Плотность тока в стабилизирующей обмотке J_c принимают такой же, как и в обмотке добавочных полюсов. Если расчёт обмотки производится до проектирования обмотки добавочных полюсов, то плотность тока в стабилизирующей обмотке, предварительно, можно выбрать по рекомендациям для обмотки возбуждения.

Сечение проводника стабилизирующей обмотки

$$q'_c = \frac{I_{2н}}{a_c \cdot J_c}. \quad (7.8)$$

Марка провода и конфигурация сечения проводника выбираются по рекомендациям, приведённым в таблице 7.3. В целях унификации стабилизирующую обмотку выполняют из того же провода, что и обмотку добавочных полюсов. Поэтому, после проектирования обмотки добавочных полюсов в расчёты стабилизирующей обмотки вносят соответствующие коррективы.

Средняя длина витка стабилизирующей обмотки из круглого и прямоугольного изолированного медного провода

$$l_{c\text{cp}} = 2 \cdot (l_{2н} + b_{2н}) + \pi \cdot (b_{c\text{кт}} + 2 \cdot \delta_{c\text{из}}), \quad (7.9)$$

где $\delta_{c\text{из}}$ - толщина изоляции катушки плюс односторонний зазор между катушкой и полюсом. Изоляция обмотки от полюсного сердечника определяется по данным таблиц 7.1 – 7.2. Зазор между катушкой и полюсным сердечником выбирается в пределах $(0,5 - 0,8) \cdot 10^{-3}$ м;

$b_{c\text{кт}}$ - ширина катушки стабилизирующей обмотки. Выбирается предварительно и определяется окончательно после размещения обмоток в междуполюсном окне.

Предварительно, ширину катушки стабилизирующей обмотки можно принять при числе полюсов $2p = 2$

$$b_{c\text{кт}} \approx 0,3 \cdot D, \quad (7.10)$$

а при $2p = 4$

$$b_{c\text{кт}} \approx 0,1 \cdot D. \quad (7.11)$$

Если стабилизирующая обмотка выполняется из голой шинной меди, то для того, чтобы избежать появления трещин при изгибе провода на ребро, радиус закругления по внутренней поверхности проводника следует выбирать больше чем

$$R' = 0,05 \frac{b^2}{a}, \quad (7.12)$$

где b - больший размер неизолированного провода, мм;

a - меньший размер неизолированного провода, мм.

Допустимый радиус изгиба проводника на ребро необходимо учитывать в расчётах средней длины витка

$$l_{c\text{cp}} = 2 \cdot [l_{zn} + b_{zn} - 2 \cdot (R_{uz} - \delta_{cuz})] + \pi \cdot (b_{c\text{км}} + 2 \cdot R_{uz}), \quad (7.13)$$

где R_{uz} - выбранный радиус изгиба проводника на ребро, м.

Сопротивление стабилизирующей обмотки при температуре 20°C и при расчётной температуре θ :

$$r_{c20} = \rho_{20} \frac{2p \cdot w_c \cdot l_{c\text{cp}}}{q_c \cdot a_c^2}; \quad (7.14)$$

$$r_{c\theta} = r_{c20} \cdot k_m, \quad (7.15)$$

где k_m - коэффициент пересчёта сопротивления обмотки с температуры 20°C на расчётную температуру (страница 44, таблица 3.8).

Масса меди стабилизирующей обмотки:

$$m_c = 8900 \cdot 2p \cdot w_c \cdot q_c \cdot l_{c\text{cp}}. \quad (7.16)$$

7.4 Проектирование обмотки параллельного возбуждения

Магнитодвижущая сила обмоток независимого и параллельного возбуждения определяется по формуле (7.2).

Средняя длина витка обмотки возбуждения, м,

$$l_{в\text{cp}} = 2 \cdot (l_{zn} + b_{zn}) + \pi \cdot (b_{в\text{км}} + 2 \cdot \delta_{в\text{из}} + 2 \cdot \delta_{в\text{з}}), \quad (7.17)$$

где $b_{в\text{км}}$ - ширина катушки обмотки возбуждения, м;

$\delta_{в\text{из}}$ - толщина изоляции катушки обмотки возбуждения, м. Определяется по таблицам 7.1 и 7.2;

$\delta_{в\text{з}}$ - односторонний зазор между катушкой и полюсным сердечником, м. Принимается равным $(0,5 \dots 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Катушки обмотки возбуждения машин постоянного тока с высотой оси вращения до 200 мм выполняются многослойными сплошными прямоугольного поперечного сечения или со скошенным краем. В машинах с диаметром якоря свыше 200 мм катушки обмоток возбуждения выполняются секционирован-

ными. Это способствует улучшению условий охлаждения обмоток и позволяет повысить плотность тока в обмотке возбуждения.

Таблица 7.1 – Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока ($h=80 - 200$ мм, напряжение до 600 В)

Пози- ция на рисун- ке	Назначение	Материал			Тол- щи- на, мм	Число слоёв
		Наименование, марка				
		Класс нагревостойкости				
		В	Ф	Н		
1	Изоляция сердечника (напыление)	Эпоксидная смола			1	-
2	Изоляция катушки	Лакотканеслюдопласт			0,25	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 впол- нах- лёста
4	Рамка	Стеклотекстолит			0,5	1
		СТ	СТЭФ	СТК		

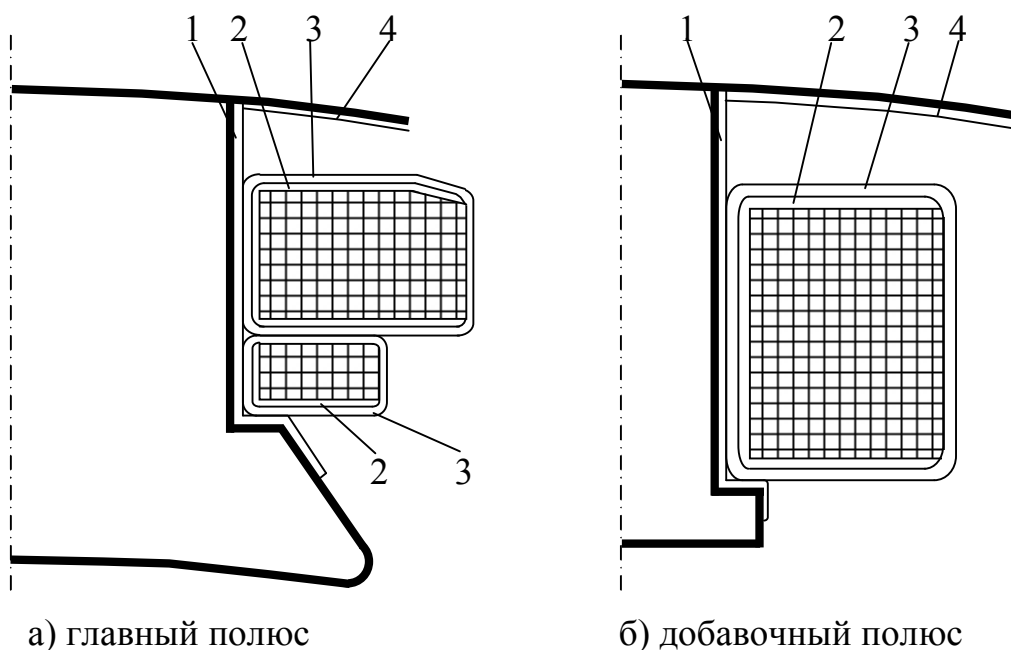
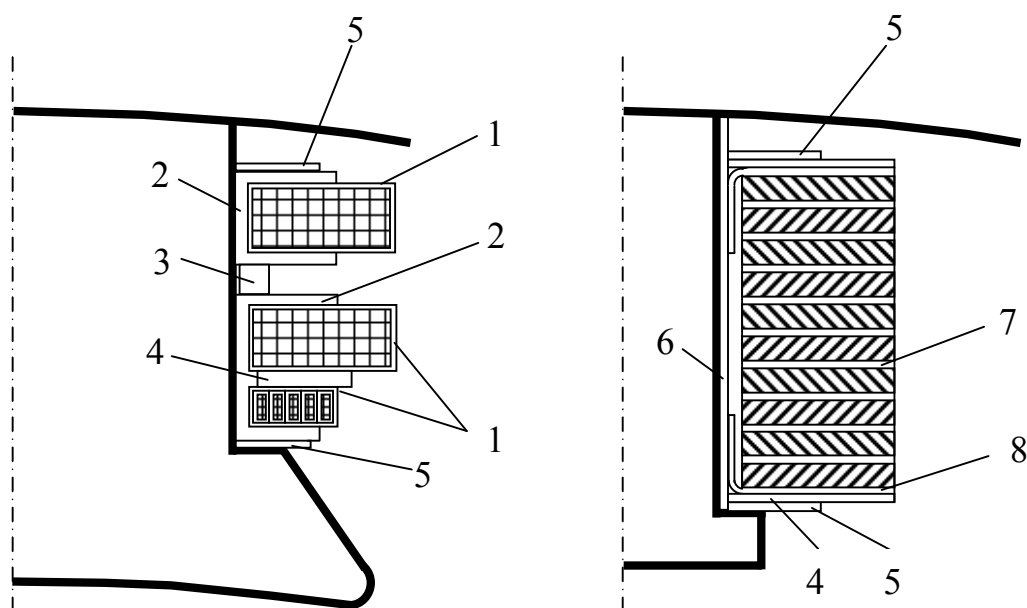


Рисунок 7.2 - Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока ($h=80 - 200$ мм, напряжение до 600 В)

Таблица 7.2 – Изоляция обмотки главных и добавочных полюсов машины постоянного тока (h=225 – 315 мм, напряжение до 600 В)

Позиция на рисунке	Назначение	Материал				Число слоёв
		Наименование, марка			Толщина, мм	
		Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости	
		В	Ф	Н		
1	Изоляция катушки	Стекланная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлёста
2	Каркас	Стеклолакоткань			2	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Скоба	Сталь марки Ст3			8-10	1
4	Рамка	Стеклотекстолит			1,5	1
		СТ	СТЭФ	СТК		
5	Рамка	Сталь марки Ст3			1,5	1
6	Изоляция сердечника	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий Н	0,16	7,5
7	Прокладка между-витковая	Асбестовая бумага	Фениловая бумага		0,3	1
8	Изоляция углов	Стекланная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлёста



а) главный полюс

б) добавочный полюс

Рисунок 7.3 - Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машины постоянного тока ($h=225 - 315$ мм, напряжение до 600 В)

Ширину катушки, предварительно, можно принять равной:
при $2p = 2$

$$b_{в\text{ кт}} \approx 0,35 \cdot D, \quad (7.18)$$

а при $2p = 4$

$$b_{в\text{ кт}} \approx 0,12 \cdot D. \quad (7.19)$$

Ширину катушки определяют окончательно после вычерчивания эскиза междуполюсного окна и размещения обмоток на главных и добавочных полюсах.

Площадь поперечного сечения проводника обмотки параллельного или независимого возбуждения (предварительно) при последовательном соединении катушек

$$q'_в = \rho_\theta \frac{k_z \cdot 2p \cdot F_{вн} \cdot l_{в\text{ ср}}}{U_n}, \quad (7.20)$$

где $k_z = 1,1 - 1,2$ - коэффициент запаса обмотки возбуждения;

ρ_θ - удельное сопротивление материала обмотки возбуждения при расчётной температуре.

По найденному сечению проводника обмотки возбуждения, с учётом рекомендаций (таблица 7.3), по приложению Б выбирают стандартный проводник. Выбор размеров проводника прямоугольного поперечного сечения производят с учётом числа витков в катушке и лучшего заполнения междуполюсного окна.

Число витков обмотки возбуждения

$$w'_\epsilon = \frac{F_{\epsilon H}}{q_\epsilon \cdot J_\epsilon}, \quad (7.21)$$

где J_ϵ - плотность тока в обмотке возбуждения, A/m^2 .

Плотность тока в обмотке возбуждения можно принять равной $(4,5 - 6) \cdot 10^6 A/m^2$ для машин со степенью защищённости $IP22$, а при исполнении по степени защиты $IP44$ плотность тока в обмотке $J_\epsilon = (2 - 4) \cdot 10^6 A/m^2$. Большие значения плотности тока рекомендуется выбирать в машинах с меньшей высотой оси вращения.

Таблица 7.3 – Марка провода и тип обмоток параллельного возбуждения, стабилизирующей обмотки и обмотки добавочных полюсов

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

Число витков обмотки возбуждения, найденное по формуле (7.21) округляют до целого числа.

Номинальный ток возбуждения, A ,

$$I_{\epsilon H} = \frac{F_{\epsilon H}}{w_\epsilon}. \quad (7.22)$$

Активное сопротивление обмотки возбуждения:

$$r_{\epsilon 20} = \rho_{20} \frac{2p \cdot w_\epsilon \cdot l_{\epsilon cp}}{q_\epsilon}, \quad (7.23)$$

$$r_{\theta} = \rho_{\theta} \frac{2p \cdot w_{\theta} \cdot l_{\theta cp}}{q_{\theta}}.$$

Максимальный ток в цепи обмотки возбуждения (при полностью выведенном регулировочном реостате):

$$I_{\theta max} = \frac{U_n}{r_{\theta}}. \quad (7.24)$$

Коэффициент запаса обмотки возбуждения:

$$k_z = \frac{I_{\theta max}}{I_{\theta n}}. \quad (7.25)$$

Значение коэффициента запаса, полученное по формуле (7.25), должно быть не менее 1,1.

8 Расчёт коммутации

Коммутация – это процесс переключения секций из одной параллельной ветви в другую, который сопровождается изменением направления тока в коммутируемой секции на противоположное. Процесс коммутации в машине постоянного тока сопровождается сложным комплексом взаимодействующих между собой электромагнитных, механических и т.д. процессов в секции и щётном контакте. На условия коммутации влияют производственно-технологические причины, например, несимметричное расположение полюсов по окружности станины.

Коммутационную надёжность машины постоянного тока оценивают по ширине безыскровой зоны коммутации, границы которой определяются экспериментально по значениям токов подпитки или отпитки добавочных полюсов, вызывающих появление искрения на коллекторе под сбегающим краем щётки.

Искрение на коллекторе машины постоянного тока оценивается по степени искрения под сбегающим краем щётки классом коммутации по шкале, приведённой в ГОСТ 183-74. Допустимая степень искрения двигателей постоянного тока единых серий и их модификаций указывается в техническом задании на разработку этих машин. Если класс коммутации в задании на проектирование не оговаривается, то при номинальном режиме работы степень искрения на коллекторе не должна превышать класса $1\frac{1}{2}$. При этом классе коммутации допускается слабое точечное искрение под большей частью сбегающего края щётки.

Точность учёта всех взаимосвязанных явлений, влияющих на коммутацию, представляет сложную задачу. Поэтому при настройке коммутации ма-

шины постоянного тока может быть изменена марка щётки, ширина щётки и величина зазора между якорем и поверхностью наконечника добавочного полюса δ_∂ . Для возможности изменения воздушного зазора между сердечником добавочного полюса и станиной размещают прокладки, общей толщиной около 50 % расчётного зазора δ_∂ .

Косвенным критерием оценки коммутационной напряжённости машины постоянного тока, при проектировании, является величина реактивной ЭДС E_p , которая индуцируется в коммутируемой секции при работе машины.

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

$$E_p = 2w_s \cdot l_2 \cdot A \cdot v_a \cdot \lambda \cdot 10^{-6}, \quad (8.1)$$

где w_s - число витков в секции обмотки якоря;

l_2 - длина магнитопровода якоря, м;

A - линейная токовая нагрузка, А/м;

$v_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_n}{60}$ - окружная скорость якоря, м/с;

λ - приведённая удельная магнитная проводимость путей потоков рассеяния.

Для овальных полузакрытых пазов якоря

$$\lambda = 0,6 \frac{h_{n2}}{2r_2} + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} + \frac{l_l}{l_2} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{w_s \cdot l_2 \cdot A \cdot v_a} \cdot \frac{a}{p}. \quad (8.2)$$

Для открытых прямоугольных пазов якоря

$$\lambda = 0,6 \frac{h_{n2}}{b_{n2}} + \frac{l_l}{l_2} + \frac{2,5 \cdot 10^5}{w_s \cdot l_2 \cdot A \cdot v_a} \cdot \frac{a}{p}. \quad (8.3)$$

9 Коллектор и щётки

Выбор марки щётки для проектируемой машины постоянного тока является весьма ответственной задачей. От марки щётки зависит коммутация и срок службы щёточно-коллекторного узла. Марку щётки выбирают при проектировании машины в зависимости от условий её работы по данным таблицы Е.2 (приложение Е), где приведены основные технические данные марок наиболее распространённых щёток. При настройке коммутации готовой машины марка щётки может быть изменена.

При выборе размеров щётки следует учитывать, что при увеличении ширины щётки $b_{щ}$ возрастает ширина зоны коммутации $b_{з.к.}$, т.е. ширина дуги окружности поверхности якоря, в границах которой находятся коммутируемые секции. Возрастает и вероятность проникновения поля главных полюсов в зону коммутации и, как следствие, коммутация может ухудшиться.

Ширину щётки, предварительно, можно определить по условиям улучшения коммутации в зависимости от типа обмотки якоря:

- при простых волновых обмотках ширина щётки принимается равной $b_{щ} = (2...4) \cdot t_k$;
- при простых петлевых обмотках ширина щётки принимается равной $b_{щ} = (u_n + 0,5) \cdot t_k$;
- при двухходовых петлевых обмотках ширина щётки принимается равной $b_{щ} > 3 \cdot t_k$.

Найденное значение ширины щётки округляют до ближайшего стандартного размера (таблица Е.1, приложение Е).

Критерием к оценке результатов выбора ширины щётки является коэффициент зоны коммутации, т.е. отношение ширины зоны коммутации к расстоянию между соседними наконечниками главных полюсов:

$$\kappa_{з.к.} = \frac{b_{з.к.}}{\tau - b_p}, \quad (9.1)$$

где ширина зоны коммутации

$$b_{з.к.} = \left(\frac{b_{щ}}{t_k} + u_n - \frac{a}{p} + \varepsilon_k \right) \cdot t_k \cdot \frac{D}{D_k}. \quad (9.2)$$

В формуле (9.2) диаметр коллектора D_k , коллекторное деление t_k , а также число секционных сторон по ширине паза u_n выбраны по рекомендациям раздела 2. Укорочение шага обмотки $\varepsilon_k = \frac{K}{2p} - y_1$, определённое в коллекторных делениях, принимают всегда со знаком плюс.

Щётка должна обеспечивать ширину зоны коммутации

$$b_{з.к.} \leq (0,55...0,7) \cdot (\tau - b_p). \quad (9.3)$$

Верхние границы этого отношения относятся к машинам с диаметром якоря до 200 мм, нижние границы соответствуют машинам с диаметром якоря более 0,4 м.

Контактная площадь всех щёток, $м^2$

$$\sum S_{щ} = \frac{2I_n}{J_{щ}} \cdot 10^{-4}, \quad (9.4)$$

где $J_{щ}$ - плотность тока в щёточном контакте, $\frac{A}{cm^2}$. Определяется по данным таблицы Е2 (приложение Е) для выбранной марки щётки.

Щётки шириной 25 и 32 мм для улучшения их контакта с коллектором при толчках и вибрациях следует подразделить на две ($2 \times 12,5$ или 2×16 мм).

Контактная площадь щёток одного brackets (щёточного болта), m^2 :

$$S_{щб} = \frac{\sum S_{щ}}{2p}. \quad (9.5)$$

Длина щётки $l_{щ}$ не должна быть более 40 мм, а отношение длины щётки к её ширине не должно быть более двух.

Выбрав щётку стандартных размеров, определяют расчётное число щёток, приходящихся на один щёточный болт:

$$N'_{щб} = \frac{S_{щб}}{S_{щ}}, \quad (9.6)$$

где $S_{щ} = b_{щ} \cdot l_{щ}$ - площадь поперечного сечения щётки, m^2 .

Расчётное число щёток на один щёточный болт округляют до ближайшего целого числа. Для надёжности работы щёточно-коллекторного узла число щёток на один щёточный болт должно быть не менее двух ($N_{щб} \geq 2$).

Активная длина коллектора, m :

$$l_k = N_{щб} \cdot (l_{щ} + 0,008) + 0,01. \quad (9.7)$$

10 Расчёт добавочных полюсов

Добавочные полюсы предназначены для улучшения коммутации машины постоянного тока. Обмотка добавочных полюсов создаёт МДС, которая компенсирует поперечное поле якоря в зоне коммутации и создаёт магнитное поле, при движении в котором в коммутируемой секции индуцируется ЭДС коммутации. Эта ЭДС направлена встречно по отношению к реактивной ЭДС и несколько превосходит её, благодаря чему коммутация приближается к линейной и даже является несколько ускоренной.

Действие добавочных полюсов должно быть пропорционально току якоря, поэтому обмотка добавочных полюсов включается последовательно в цепь якоря. Для того чтобы зависимость магнитного потока добавочного полюса от тока якорной цепи максимально приближалось к линейной, воздушный зазор между добавочным полюсом и якорем выбирают большим, чем под главным полюсом:

$$\delta_{\partial} \approx (1,5 \dots 2) \cdot \delta. \quad (10.1)$$

Конструктивно добавочные полюсы выполняются шихтованными, но могут выполняться цельными (массивными). Шихтованные сердечники полюсов прессуют с помощью заклёпок и крепят к станине с помощью болтов.

Сердечники добавочных полюсов, при диаметрах якоря до 160 мм, могут выполняться из листовой стали марки Ст3. При больших значениях диаметра якоря добавочные полюсы изготавливают из штампованных листов холоднокатаной анизотропной электротехнической стали марки 3411 толщиной 1 мм.

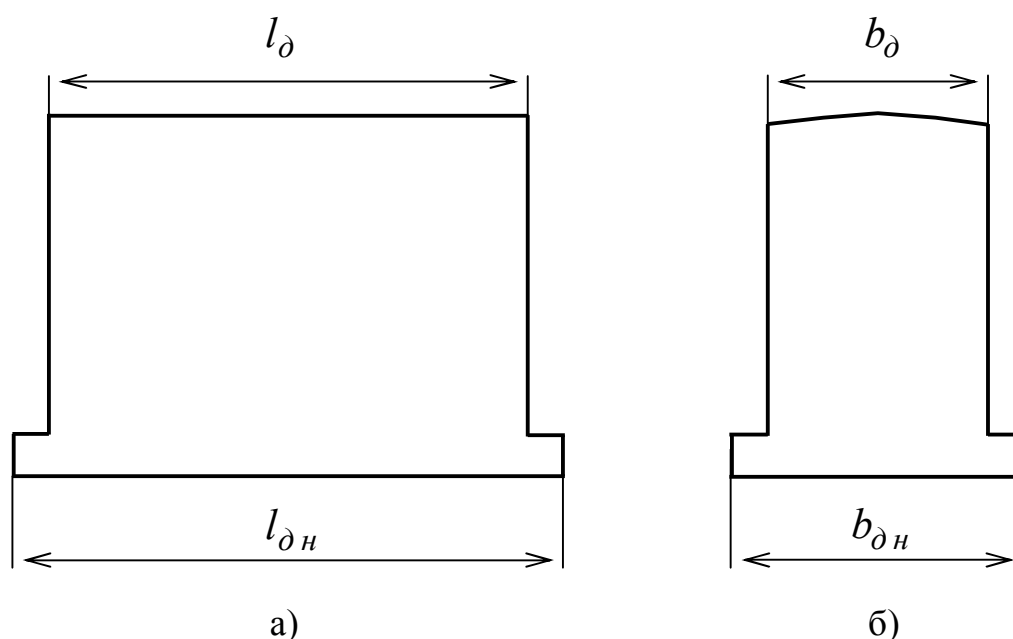


Рисунок 10.1 – Лист добавочного полюса с шихтовкой вдоль (а) и поперёк (б) оси вала ротора

В машинах постоянного тока при диаметрах якоря до 132 мм сердечники добавочных полюсов шихтуют вдоль оси вала ротора. При больших диаметрах якоря сердечники добавочных полюсов шихтуют поперёк оси вала ротора, рисунок 10.1.

Длина наконечника добавочного полюса принимается равной длине магнитопровода якоря:

$$l_{\partial н} = l_2. \quad (10.2)$$

Длина сердечника добавочного полюса принимается равной:

- при шихтовке сердечника вдоль оси вала ротора

$$l_{\partial} = l_{\partial н} - (5...10) \cdot 10^{-3}; \quad (10.3)$$

- при шихтовке сердечника поперёк оси вала ротора

$$l_{\partial} = l_{\partial н}. \quad (10.4)$$

Для ширины наконечника добавочного полюса могут быть рекомендованы следующие соотношения:

- при наличии скоса пазов якоря

$$b_{\partial н} \approx b_{зк} - (1,5...2) \cdot \delta_{\partial}; \quad (10.5)$$

- при отсутствии скоса пазов якоря

$$b_{\partial н} \approx b_{зк} - (2...3) \cdot \delta_{\partial}. \quad (10.6)$$

Ширина наконечника добавочного полюса должна удовлетворять соотношению:

$$b_{\partial н} \leq (0,55...0,75) \cdot b_{зк}. \quad (10.7)$$

Расчётная ширина наконечника добавочного полюса:

$$b'_{\partial н} = b_{\partial н} + 2\delta_{\partial}. \quad (10.8)$$

Ширина сердечника добавочного полюса принимается равной:

- для полюсов, шихтованных вдоль оси вала ротора

$$b_{\partial} = b_{\partial н}; \quad (10.9)$$

- для полюсов, шихтованных поперёк оси вала ротора, ширину полюсного сердечника добавочного полюса можно выбрать по рисунку 10.2.

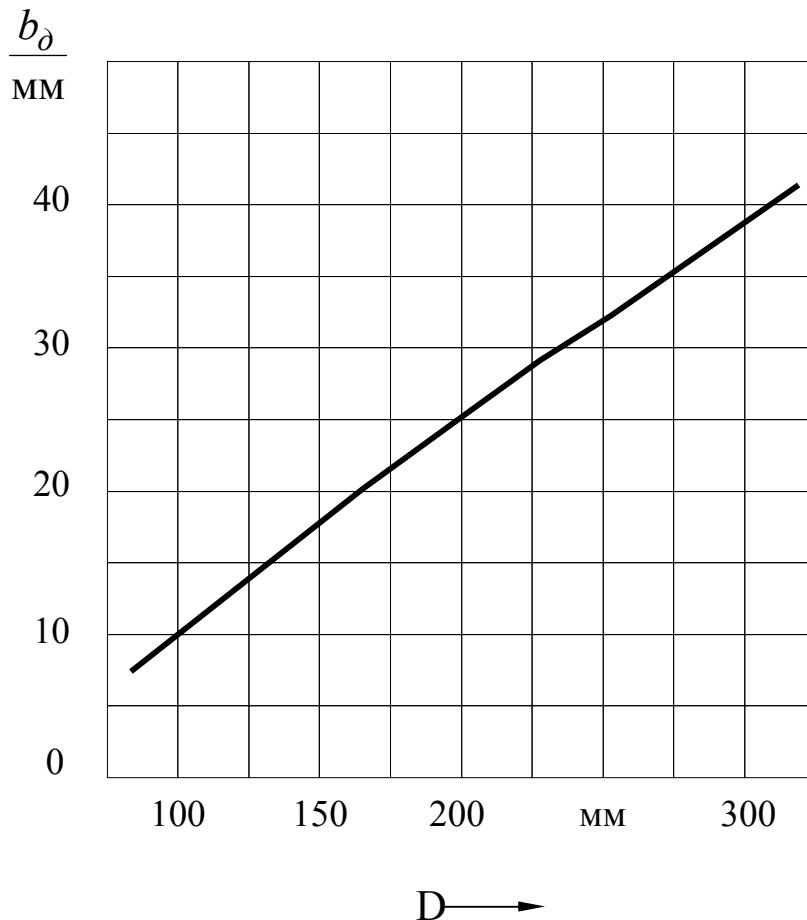


Рисунок 10.2 – К выбору ширины сердечника добавочного полюса

Высота добавочного полюса

$$h_{\delta} = \frac{D_{\text{вн}} - D}{2} - 2 \cdot \delta_{\delta}, \quad (10.10)$$

где $2 \cdot \delta_{\delta}$ учитывает как воздушный зазор, так и необходимость расположения стальных прокладок между станиной и полюсным сердечником, предназначенных для регулирования воздушного зазора δ_{δ} .

Магнитная индукция в воздушном зазоре между поверхностью якоря и добавочным полюсом, Тл:

$$B_{\delta\delta} = \frac{(1,05 - 1,1) \cdot E_p}{2w_s \cdot l_{\delta} \cdot v_a}, \quad (10.11)$$

где w_s - число витков в секции обмотки якоря;

$v_a = \frac{\pi \cdot D \cdot n_n}{60}$ - окружная скорость движения проводников секции, м/сек.

Для определения МДС обмотки добавочных полюсов необходимо рассчитать магнитные напряжения на участках магнитной цепи пути потока добавочного полюса и полную МДС обмотки на один полюс. Определяя магнитные напряжения в ярме якоря и в станине, необходимо учесть, что по этим участкам магнитной цепи, кроме потока добавочных полюсов, проходит и основной магнитный поток. Как в ярме якоря, так и в станине выделяются участки магнитной цепи, на которых магнитные потоки главных и добавочных полюсов имеют как согласное, так и встречное направление. Взаимное направление магнитных потоков необходимо учитывать при определении магнитных напряжений. Распределение магнитных потоков главных и добавочных полюсов по участкам магнитной цепи показано на рисунке 10.3.

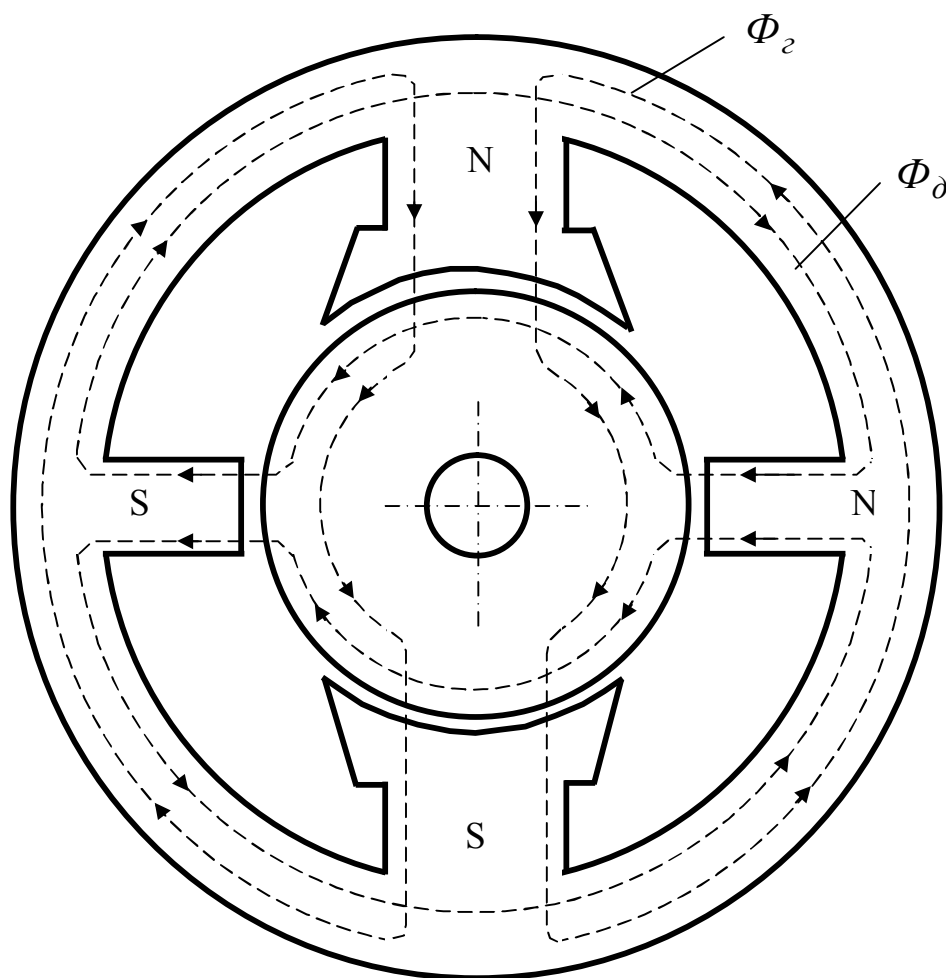


Рисунок 10.3 – К определению магнитных напряжений на участках магнитной цепи потока добавочного полюса

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

$$\Phi_{\delta\delta} = B_{\delta\delta} \cdot l_{\delta} \cdot b'_{\delta n}. \quad (10.12)$$

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса, Вб:

$$\Phi_{\delta} = \sigma_{\delta} \cdot \Phi_{\delta\delta}, \quad (10.13)$$

где σ_{δ} - коэффициент рассеяния добавочных полюсов; $\sigma_{\delta} = 2,5 \dots 3,5$ – для машин без компенсационной обмотки; $\sigma_{\delta} = 2$ – для машин с компенсационной обмоткой.

Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса, Тл:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{l_{\delta} \cdot b_{\delta} \cdot k_{c\delta}}, \quad (10.14)$$

где $k_{c\delta} = 0,98$ - коэффициент заполнения сталью полюсного сердечника добавочного полюса.

Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса не должна превышать 1,6 Тл.

Коэффициент воздушного зазора, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора между добавочным полюсом и поверхностью якоря, вызванное открытием пазов на якоре:

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{uu}}{t_z - b_{uu} + 10\delta_{\delta}}. \quad (10.15)$$

Коэффициент воздушного зазора, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора между добавочным полюсом и поверхностью якоря, вызванное наличием бандажных канавок при бандажах из стеклоленты:

$$k_{\delta\kappa} = 1 + \frac{b_{\delta} \cdot h_{\delta}}{l_2 \cdot (\delta_{\delta} + h_{\delta}) - b_{\delta} \cdot h_{\delta}}. \quad (10.16)$$

Коэффициент воздушного зазора при бандажах из стальной проволоки:

$$k_{\delta\kappa} = 1 + \frac{b_{\delta} \cdot (h_{\delta} - 0,8 \cdot d)}{l_2 \cdot (\delta_{\delta} + h_{\delta} - 0,8 \cdot d) - b_{\delta} \cdot (h_{\delta} - 0,8 \cdot d)}. \quad (10.17)$$

Результирующий коэффициент воздушного зазора равен:

$$k_{\delta\delta} = k_{\delta 2} \cdot k_{\delta\kappa}. \quad (10.18)$$

Магнитное напряжение воздушного зазора равно, А:

$$F_{\delta\delta} = 0,8 \cdot \delta_{\delta} \cdot k_{\delta\delta} \cdot B_{\delta\delta} \cdot 10^6. \quad (10.19)$$

Расчётное значение магнитной индукции в зубце якоря при овальных полузакрытых пазах, Тл:

$$B_{zp} = \frac{B_{\delta\delta} \cdot t_{z\max}}{b_{zcp} \cdot k_c}. \quad (10.20)$$

По значению магнитной индукции по кривым намагничивания, приведённым в приложении Г, определяют напряжённость магнитного поля H_{zp} и вычисляют магнитное напряжение зоны зубцов.

Если на якоре пазы выполняются прямоугольными, то магнитное напряжение зоны зубцов якоря можно определить по значениям магнитной индукции в трёх сечениях зубца:

- в максимальном сечении зубца

$$B_{z\min} = k_{z1} \cdot B_{\delta\delta}; \quad (10.21)$$

- в среднем сечении зубца

$$B_{zcp} = k_{z2} \cdot B_{\delta\delta}; \quad (10.22)$$

- в минимальном сечении зубца

$$B_{z\max} = k_{z3} \cdot B_{\delta\delta}. \quad (10.23)$$

Для трёх значений магнитной индукции, по приложению Г, определяют три значения напряжённости магнитного поля и находят расчётное значение напряжённости магнитного поля:

$$H_{zp} = \frac{1}{6} (H_{z\max} + 4 \cdot H_{zcp} + H_{z\min}). \quad (10.24)$$

По расчётному значению напряжённости магнитного поля зоны зубцов вычисляют магнитное напряжение:

$$F_{z\delta} = H_{zp} \cdot L_z, \quad (10.25)$$

где L_z — длина силовой линии поля в зоне зубцов.

Вычисляют магнитную индукцию в ярме якоря, Тл:

- на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочных полюсов

$$B_{j1} = \frac{\Phi_{\delta} + \Phi_{\delta\partial}}{2S_j}, \quad (10.26)$$

где Φ_{δ} – магнитный поток главного полюса в воздушном зазоре при номинальном значении ЭДС;

- на участке встречного направления магнитных потоков

$$B_{j2} = \frac{\Phi_{\delta} - \Phi_{\delta\partial}}{2S_j}. \quad (10.27)$$

По полученным значениям магнитной индукции, по приложению Г, определяют соответствующие значения напряжённости магнитного поля и находят расчётное значение напряжённости магнитного поля, А/м:

$$H_{jp} = 0,5 \cdot (H_{1j} - H_{2j}). \quad (10.28)$$

Магнитное напряжение ярма якоря, А:

$$F_{j\partial} = H_{jp} \cdot L_j, \quad (10.29)$$

где L_j – длина силовой линии магнитного поля, определялась на странице 57.

Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса, Тл:

$$B_{\partial} = \frac{\Phi_{\partial}}{b_{\partial} \cdot l_{\partial} \cdot k_{c\partial}}. \quad (10.30)$$

Магнитное напряжение сердечника добавочного полюса, А:

$$F_{\partial} = H_{\partial} \cdot h_{\partial}. \quad (10.31)$$

Расчётный технологический зазор между сердечником добавочного полюса и станиной, м:

$$\delta_{\partial c} = (1 + 2 \cdot l_{c\partial}) \cdot 10^{-4}, \quad (10.32)$$

где $l_{c\delta}$ - длина сердечника добавочного полюса, м.

Магнитное напряжение технологического зазора между сердечником добавочного полюса и станиной, А:

$$F_{\delta\delta c} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot \delta_{\delta c} \cdot 10^6. \quad (10.33)$$

Магнитная индукция в станине, Тл:

- на участке согласного направления магнитного потока главного и добавочного полюсов:

$$B_{c1} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot \sigma + \Phi_{\delta}}{2S_c}. \quad (10.34)$$

- на участке встречного направления магнитного потока главного и добавочного полюсов:

$$B_{c2} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot \sigma - \Phi_{\delta}}{2S_c}. \quad (10.35)$$

По полученным значениям магнитной индукции, по приложению Г, определяют соответствующие значения напряжённости магнитного поля, находят расчётное значение

$$H_{cp} = 0,5 \cdot (H_{c1} - H_{c2}) \quad (10.36)$$

и вычисляют магнитное напряжение станины:

$$F_{c\delta} = H_{cp} \cdot L_c, \quad (10.37)$$

где L_c – длина силовой линии поля в станине, определялась для вычислений по формуле 6.39 (страница 59).

Суммарное магнитное напряжение всех участков магнитной цепи потока добавочного полюса

$$F_{\Sigma\delta} = F_{\delta\delta} + F_{z\delta} + F_{j\delta} + F_{\delta} + F_{\delta\delta c} + F_{c\delta}. \quad (10.38)$$

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов в расчёте на один полюс

$$F_{\delta} = F_{\Sigma\delta} + \frac{A \cdot \tau}{2}. \quad (10.39)$$

Для хорошо спроектированных машин магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов должна находиться в пределах

$$F_{\partial} = (1,2...1,4) \cdot \frac{A \cdot \tau}{2}. \quad (10.40)$$

Число витков обмотки добавочного полюса:

$$w'_{\partial} = \frac{F_{\partial} \cdot a_{\partial}}{I_{2H}}, \quad (10.41)$$

где a_{∂} – число параллельных ветвей. Для обмотки добавочного полюса можно рекомендовать выбрать $a_{\partial} = 1$. В машинах с компенсационной обмоткой обычно принимают число параллельных ветвей a_{∂} равным числу параллельных ветвей компенсационной обмотки. Число витков обмотки добавочных полюсов округляют до целого числа.

Сечение провода обмотки добавочного полюса, мм^2 :

$$q'_{\partial} = \frac{I_{2H}}{a_{\partial} \cdot J_{\partial}}, \quad (10.42)$$

где J_{∂} – плотность тока в обмотке добавочных полюсов, А/мм^2 . Плотность тока J_{∂} в машинах исполнения по степени защиты $IP22 (IP23)$, предварительно, можно принять равной $(4...6) \cdot 10^6 \text{ А/мм}^2$, при исполнении по степени защиты $IP44$ - $J_{\partial} \approx (2...3) \cdot 10^6 \text{ А/мм}^2$.

Тип обмотки выбирают с учётом рекомендаций, приведённых в таблице 7.3. Размеры обмоточного провода выбирают по приложению В.

При определении средней длины витка многослойной катушки из изолированного провода принимают, предварительно, среднюю ширину катушки, мм :

- при $2p_{\partial} = 1$

$$b'_{k\partial} \approx 0,27 \cdot D; \quad (10.43)$$

- при $2p_{\partial} \geq 2$

$$b'_{k\partial} \approx 0,12 \cdot D. \quad (10.44)$$

Для однорядных обмоток ширина катушки равняется большему размеру проводника. Больший размер проводника, предварительно, можно принять равным, мм :

- при диаметрах якоря $D = 180 - 300 \text{ мм}$

$$b \approx 0,09 \cdot D; \quad (10.45)$$

- при диаметрах якоря $D > 300 \text{ мм}$

$$b \approx 20 + 0,025 \cdot D. \quad (10.46)$$

По сечению проводника и найденному размеру b , с учётом допустимого радиуса изгиба проводника (страница 65), выбирают по приложению В стандартный провод с размерами $a \times b$. Принимают

$$b_{\kappa \partial} = b. \quad (10.47)$$

Средняя длина витка многослойной катушки обмотки добавочных полюсов:

$$l_{\partial \text{cp}} = 2 \cdot (l_{c \partial} + b_{c \partial}) + \pi \cdot (b_{\kappa \partial} + 2 \cdot \Delta_{\text{из}}), \quad (10.48)$$

где $\Delta_{\text{из}}$ – толщина изоляции обмотки добавочного полюса, включая зазор между полюсным сердечником и катушкой добавочного полюса, м.

Средняя длина витка однослойной катушки обмотки добавочных полюсов, намотанной на ребро:

$$l_{\partial \text{cp}} = 2 \cdot l_{c \partial} + \pi \cdot (b_{\kappa \partial} + b_{c \partial} + 2 \cdot \Delta_{\text{из}}). \quad (10.49)$$

Ом: Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре 20°C ,

$$r_{\partial 20} = \rho_{20} \frac{2 p_{\partial} \cdot w_{\partial} \cdot l_{\partial \text{cp}}}{q_{\partial} \cdot a_{\partial}^2}. \quad (10.50)$$

ре: Сопротивление обмотки добавочных полюсов при расчётной температуре:

$$r_{\partial \theta} = r_{\partial 20} \cdot k_m. \quad (10.51)$$

Масса обмотки добавочных полюсов, кг:

$$m_{\partial} = 8900 \cdot 2 p_{\partial} \cdot w_{\partial} \cdot l_{\partial \text{cp}} \cdot q_{\partial}. \quad (10.52)$$

11 Размещение обмоток главных и добавочных полюсов

Проверка возможности размещения обмоток главных и добавочных полюсов в междуполюсном пространстве заключается в определении размеров поперечного сечения катушек и вычерчивании в масштабе междуполюсного пространства с обмотками, размещёнными на полюсах.

Катушки обмоток в поперечном сечении могут иметь форму прямоугольника или прямоугольника со скошенным краем (с изменяющимся числом витков в слое), которая даёт возможность лучше использовать междуполюсное пространство.

Для многослойных обмоток, которые выполняются из обмоточного провода круглого и прямоугольного поперечного сечения, выполняют раскладку обмоток (проектирование обмоток) и определяют число слоёв обмотки, число витков обмотки в слое (для катушек со скошенным краем – число витков в каждом слое) и размеры катушек.

Число слоёв обмотки определяют по ранее предварительно выбранному значению ширины катушки:

$$n'_{cl} = \frac{b'_k}{1,05 \cdot d_{из}}, \quad (11.1)$$

где b'_k – ширина катушки, выбранная по рекомендациям при проектировании обмотки, м;

$d_{из}$ – диаметр изолированного проводника, м.

Полученное значение числа слоёв (числа проводников по ширине катушки) округляют до целого числа и определяют число витков в слое:

$$w'_{cl} = \frac{w}{n_{cl}}, \quad (11.2)$$

где w – число витков обмотки.

Число витков в слое округляют до большего ближайшего целого числа.

Если обмотка выполняется из обмоточного провода круглого поперечного сечения, то размеры поперечного сечения катушки принимают равными, м:

- ширина катушки

$$b_k = 1,05 \cdot n_{cl} \cdot d_{из}; \quad (11.3)$$

- высота катушки

$$h_k = 1,05 \cdot w_{cl} \cdot d_{из}. \quad (11.4)$$

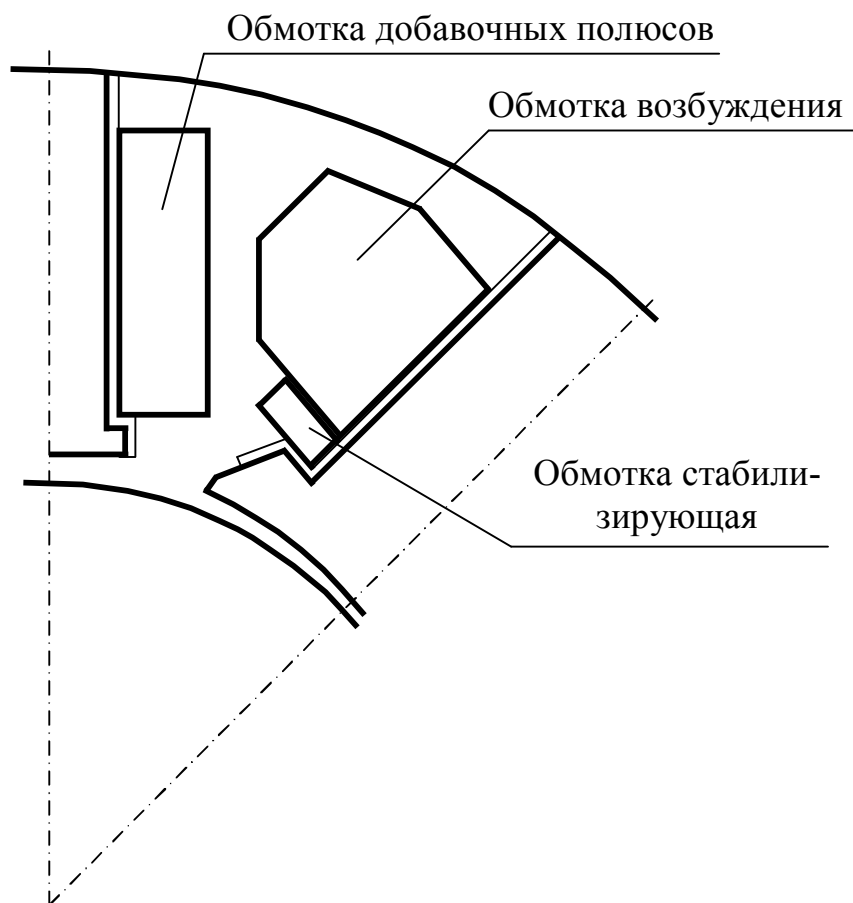


Рисунок 11.1 – Эскиз размещения обмотки добавочных полюсов и обмотки возбуждения со скошенным краем в междуполусном пространстве

Обмотки полюсов из обмоточного провода прямоугольного поперечного сечения выполняются в виде многослойных с намоткой провода плашмя (большой стороной по высоте полюса). Для таких обмоток число слоёв и число витков обмотки определяют по формулам (11.1) и (11.2) с заменой диаметра изолированного проводника $d_{из}$ на меньший размер изолированного проводника прямоугольного поперечного сечения $a_{из}$. Соответственно, ширина и высота катушки (м)

$$b_k = 1,05 \cdot n_{сл} \cdot a_{из}, \quad (11.5)$$

$$h_k = 1,05 \cdot w_{сл} \cdot b_{из}. \quad (11.6)$$

Высота однослойной обмотки, выполняемой намоткой на ребро неизолированных проводников прямоугольного поперечного сечения, м

$$h_k = 1,03 \cdot [w \cdot a + (w - 3) \cdot h_u] + h_u', \quad (11.7)$$

где a – меньший размер неизолированного проводника, м;

$h_u = 0,3 \cdot 10^{-3}$ – толщина изоляции между витками, м;

$h'_u = 2 \cdot 10^{-3}$ – толщина усиленной изоляции крайних витков, м.

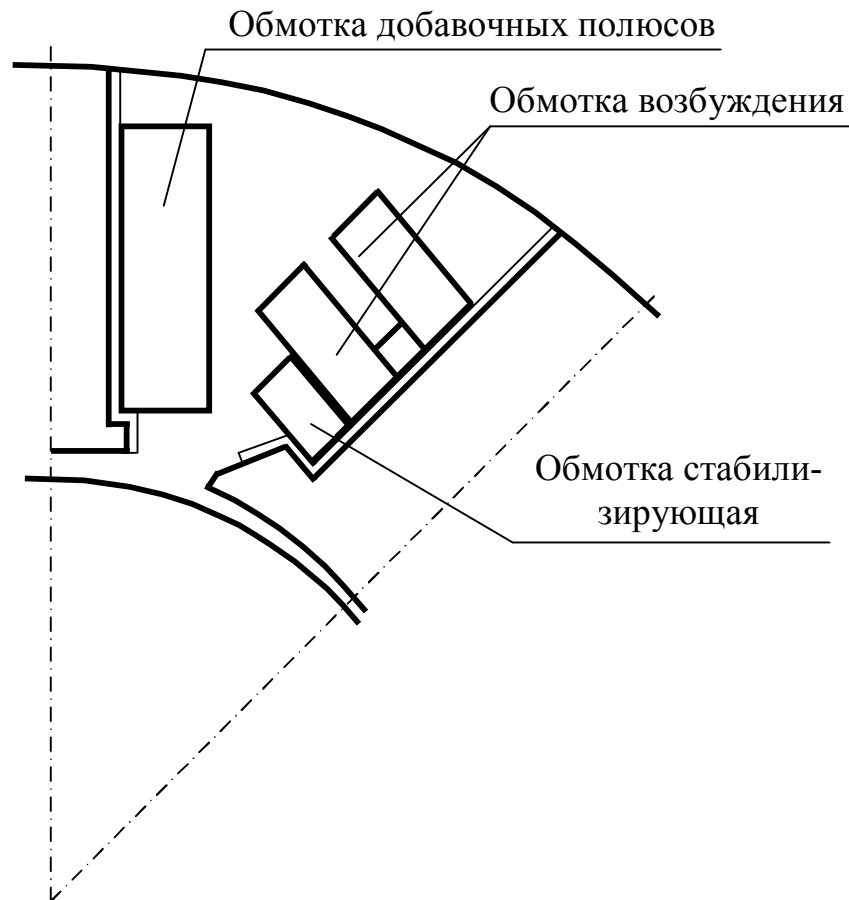


Рисунок 11.2 - Эскиз размещения обмотки добавочных полюсов и секционированной обмотки возбуждения в межполюсном пространстве

Размещение катушек должно быть таким, чтобы расстояние между катушками было не менее 6 мм для машин с высотой оси вращения $h \leq 200$ мм и не менее 8 мм для машин с $h \geq 225$ мм. Между станиной и обмоткой при отсутствии изоляционных прокладок должны быть аналогичные расстояния.

Если при выполнении чертежа межполюсного пространства добиться указанных расстояний не удаётся, то нужно увеличить внутренний диаметр станины и увеличить длину станины, сохраняя магнитную индукцию в станине в допустимых пределах. Эскизы межполюсного пространства показаны на рисунках 11.1 и 11.2.

12 Расчёт потерь мощности в двигателе постоянного тока

В машинах постоянного тока различают следующие виды потерь мощности:

- электрические потери мощности в обмотках якорной цепи и в цепи обмотки возбуждения;
- электрические потери мощности в щёточном контакте;
- магнитные потери мощности в магнитопроводе якоря (потери от вихревых токов и на гистерезис);
- механические потери мощности на трение щёток о коллектор, на трение в подшипниках, на трение вращающихся частей машины о воздух;
- потери мощности на вентиляцию;
- добавочные потери мощности.

Магнитные потери мощности, механические потери и потери на вентиляцию в машинах постоянного тока (кроме двигателей последовательного возбуждения) относят к потерям холостого хода.

12.1 Расчёт потерь холостого хода

Магнитные потери мощности, или потери в стали, возникают на участках магнитной цепи, по которым проходит переменный магнитный поток. В машинах постоянного тока в установившемся режиме эти потери возникают в магнитопроводе якоря (в зубцах и в ярме), который вращается в постоянном магнитном поле.

Потери в стали зависят от марки стали, толщины листов стали, которыми шихтован магнитопровод, от величины магнитной индукции и частоты перемагничивания, от массы стали данного участка магнитной цепи.

На потери в стали влияют технологические факторы. Например, при штамповке листов якоря по периметру вырубке образуется наклёп и заусенцы. Наклёп изменяет структуру стали и увеличивает потери на гистерезис. Заусенцы вызывают замыкание некоторых листов стали, что увеличивает потери от вихревых токов.

Потери мощности в стали определяют как сумму потерь в ярме и в зубцах якоря, Вт:

$$P_{cm} = p_{y\partial 1/50} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot (k_{yna} \cdot m_a \cdot B_j^2 + k_{ynz} \cdot m_{z2} \cdot B_{zcp}^2), \quad (12.1)$$

где $p_{y\partial 1/50}$ - удельные потери мощности в стали, Вт/кг;

β - показатель степени зависимости потерь мощности в стали от частоты перемагничивания;

m_a и m_{z2} - масса ярма и зубцов якоря, кг;

B_j - магнитная индукция в ярме якоря, Тл;

B_{zcp} - среднее значение магнитной индукции в зубце якоря, Тл;

$k_{yna} = 2,3$ - коэффициент увеличения потерь мощности в ярме якоря;

$k_{ynz} = 2,3$ - коэффициент увеличения потерь мощности в зубцах якоря.

ря.

Удельные потери мощности $p_{y\partial 1/50}$ и показатель степени β определяются по данным таблицы 12.1 в зависимости от марки выбранной стали магнитопровода якоря.

Таблица 12.1

Марка стали	$p_{y\partial 1/50},$ $Вт / кг$	β	Марка стали	$p_{y\partial 1/50},$ $Вт / кг$	β
2013,	2.5	1.5	2312,	1.75	1.4
2212	2.2	1.5	2411	1.6	1.3

Среднее значение магнитной индукции в зубце и магнитная индукция в ярме определяются по результатам расчёта магнитной цепи при номинальном магнитном потоке.

Масса ярма якоря, кг,

$$m_a = 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \left[(D - 2 \cdot h_{n2})^2 - D_o^2 - n_k \cdot d_k^2 \right] \cdot l_2 \cdot k_c. \quad (12.2)$$

Масса зубцов якоря, кг:

- пазы якоря овальные полузакрытые

$$m_{z2} = 7800 \cdot z_2 \cdot b_{zcp} \cdot \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2} \right) \cdot l_2 \cdot k_c; \quad (12.3)$$

- пазы якоря прямоугольные открытые

$$m_{z2} = 7800 \cdot z_2 \cdot b_{zcp} \cdot h_{n2} \cdot l_2 \cdot k_c, \quad (12.4)$$

где b_{zcp} - среднее значение ширины зубца, м.

Механические потери мощности и потери на вентиляцию, Вт:

- для машин со степенью защиты IP22 и способом охлаждения IC01

$$P_{mn} + P_{вен} = 780 \cdot (D \cdot 1000)^{3,6} \cdot \left(\frac{n}{1500} \right)^{1,8} 10^{-9}; \quad (12.5)$$

- для машин со степенью защиты *IP22* или *IP44* и способом охлаждения *IC17* или *IC37*

$$P_{mn} + P_{вен} = 3,85 \cdot (D \cdot 1000)^4 \cdot \left(\frac{n}{1500} \right)^2 10^{-9}; \quad (12.6)$$

- для машин со степенью защиты *IP44* и способом охлаждения *IC0141*

$$P_{mn} + P_{вен} = 2200 \cdot (D \cdot 1000)^{3,6} \cdot \left(\frac{n}{1500} \right)^2 10^{-9}; \quad (12.7)$$

- для машин со степенью защиты *IP44* и способом охлаждения *IC0041*

$$P_{mn} + P_{вен} = 280 \cdot (D \cdot 1000)^{3,6} \cdot \left(\frac{n}{1500} \right)^{1,8} 10^{-9}. \quad (12.8)$$

Потери на трение в щёточном контакте, *кВт*.

$$P_{тщ} = \rho_{тщ} \cdot p_{щ} \cdot v_{щ} \cdot S_{\Sigma щ}, \quad (12.9)$$

где $\rho_{тщ} = 0,25$ – коэффициент трения щётки о коллектор;

$p_{щ}$ - давление на щётку, *кПа*;

$v_{щ} = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_n}{60}$ - окружная скорость по коллектору, *м/сек*.

12.2 Определение номинальных токов двигателя

Для определения номинального тока якоря необходимо знать добавочные потери при нагрузке. В машинах постоянного тока общего назначения эти потери мощности учитывают приближённо. Согласно ГОСТ 11828-86, добавочные потери при нагрузке для машин постоянного тока с компенсационной обмоткой составляют 0,5% от потребляемой номинальной мощности, а для машин без компенсационной обмотки - 1%:

$$P_{добн} = 0,01 \cdot \frac{P_{2н}}{\eta_n}. \quad (12.10)$$

Электромагнитная мощность двигателя

$$P_{эм} = P_{2н} + P_{ст} + P_{мех} + P_{вент} + P_{тщ} + P_{добн}. \quad (12.11)$$

Номинальная ЭДС якоря двигателя, B :

$$E_n = \frac{U_n - \Delta U_{\text{щ}}}{2} + \sqrt{\left(\frac{U_n - \Delta U_{\text{щ}}}{2}\right)^2 - P_{\text{эм}} \cdot R_{\Sigma}}, \quad (12.12)$$

где $R_{\Sigma} = r_{a\theta} + r_{c\theta} + r_{d\theta}$ - активное сопротивление обмоток якорной цепи при расчётной температуре, Ом.

Уточнённое значение номинального тока якорной цепи, А:

$$I_{2n} = \frac{P_{\text{эм}}}{E_n}. \quad (12.13)$$

Для нахождения номинального тока возбуждения уточняют МДС обмотки возбуждения в режиме номинальной нагрузки.

По значению номинального магнитного потока в воздушном зазоре:

$$\Phi_{\delta n} = \frac{60 \cdot E_n \cdot a}{p \cdot N \cdot n_n} \quad (12.14)$$

определяют магнитную индукцию в воздушном зазоре

$$B_{\delta n} = \frac{\Phi_{\delta n}}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}}. \quad (12.15)$$

По значению магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta n}$ по характеристике холостого хода определяют МДС F_{Σ} , необходимую для создания в воздушном зазоре машины номинального магнитного потока $\Phi_{\delta n}$.

МДС стабилизирующей обмотки F_c вычисляют по формуле (7.7) для номинального тока якоря.

Размагничивающее действие поперечного поля якоря F_{qd} , соответствующее уточнённому значению номинального тока якоря, определяют по переходной характеристике по методике, описанной в подразделе 7.2. В расчётах используют уточнённое значение линейной токовой нагрузки:

$$A = A' \frac{I_{2n}}{I_{2n}'}, \quad (12.16)$$

где A' и I_{2n}' - линейная токовая нагрузка и номинальный ток якоря, определённые (предварительно) в разделе 2.

По значению суммарной МДС F_Σ , МДС стабилизирующей обмотки F_c и размагничивающему действию поперечного поля якоря F_{qd} уточняют МДС обмотки возбуждения ($F_{вн} = F_\Sigma + F_{qd} - F_c$). Номинальный ток возбуждения:

$$I_{вн} = \frac{F_{вн}}{w_\phi}. \quad (12.17)$$

В дальнейших расчётах в качестве номинальной ЭДС, номинального тока якоря и номинального тока возбуждения используют значения, полученные по формулам (12.12), (12.13) и (12.17).

13 Расчёт рабочих характеристик двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Под рабочими характеристиками двигателя понимают зависимость от полезной мощности тока двигателя I_1 , потребляемой мощности P_1 , коэффициента полезного действия η , частоты вращения ротора n и полезного момента на валу M_2 при условии, что напряжение сети и ток возбуждения остаются постоянными и равны номинальным значениям.

Для расчёта рабочих характеристик задаются рядом значений тока якоря $I_2 = 0,1 \cdot I_{2н}$, $I_2 = 0,25 \cdot I_{2н}$, $I_2 = 0,5 \cdot I_{2н}$, $I_2 = 0,75 \cdot I_{2н}$, $I_2 = I_{2н}$, $I_2 = 1,25 \cdot I_{2н}$.

Для каждого значения тока якоря определяют электрические потери мощности в обмотках, кВт:

- якоря

$$P_{\text{я}a} = I_2^2 \cdot r_{a\theta} \cdot 10^{-3}; \quad (13.1)$$

- добавочных полюсов

$$P_{\text{я}d} = I_2^2 \cdot r_{d\theta} \cdot 10^{-3}; \quad (13.2)$$

- стабилизирующей обмотке (если она предусмотрена в конструкции машины)

$$P_{\text{я}c} = I_2^2 \cdot r_{c\theta} \cdot 10^{-3}. \quad (13.3)$$

Определяют электрические потери мощности в щёточном контакте, кВт:

$$P_{\text{я}щ} = 2\Delta U_{щ} \cdot I_2 \cdot 10^{-3}. \quad (13.4)$$

Добавочные потери мощности при токе якоря I_2 , кВт:

$$P_{\text{доб}} = P_{\text{добн}} \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2н}} \right)^2. \quad (13.5)$$

Потери мощности в цепи обмотки параллельного возбуждения (кВт) остаются постоянными при изменении тока якорной цепи и равны

$$P_{\text{эв}} = U_n \cdot I_{\text{вн}} \cdot 10^{-3}. \quad (13.6)$$

Полные потери мощности в машине, кВт:

$$p_{\Sigma} = P_{\text{эа}} + P_{\text{эс}} + P_{\text{эд}} + P_{\text{эщ}} + P_{\text{эв}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{трщ}} + \\ + P_{\text{мех}} + P_{\text{вент}} + P_{\text{доб}}. \quad (13.7)$$

Ток двигателя, А:

$$I_1 = I_2 + I_{\text{вн}}. \quad (13.8)$$

Мощность, потребляемая из сети, кВт:

$$P_1 = U_n \cdot I_1 \cdot 10^{-3}. \quad (13.9)$$

Полезная мощность на валу двигателя, кВт:

$$P_2 = P_1 - p_{\Sigma}. \quad (13.10)$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (13.11)$$

ЭДС в обмотке якоря при токе якоря I_2 , В:

$$E = U_n - (r_{\text{а} \theta} + r_{\text{с} \theta} + r_{\text{д} \theta}) \cdot I_2 - 2\Delta U_{\text{щ}}. \quad (13.12)$$

При изменении тока якоря размагничивающее действие поперечного поля якоря, приближённо, изменяется пропорционально току якоря:

$$F_{qd} \approx F_{qdн} \cdot \frac{I_2}{I_{2н}}, \quad (13.13)$$

где $F_{qдн}$ – размагничивающее действие поперечного поля якоря, определённое в подразделе 12.2 при уточнении номинального тока возбуждения. МДС стабилизирующей обмотки, А:

$$F_c = w_c \cdot I_2. \quad (13.14)$$

Суммарная МДС, А:

$$F_{\Sigma} = F_{вн} + F_c - F_{qд}, \quad (13.15)$$

где $F_{вн}$ – номинальное значение МДС обмотки возбуждения, определённое в подразделе 12.2.

По суммарной МДС F_{Σ} по характеристике холостого хода определяют среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре машины и вычисляют магнитный поток, Вб:

$$\Phi_{\delta} = \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot B_{\delta}. \quad (13.16)$$

Частоту вращения ротора (об/мин) при нагрузке, соответствующей току якоря I_2 , определяют по выражению

$$n = \frac{60 \cdot E \cdot a}{p \cdot N \cdot \Phi_{\delta}}. \quad (13.17)$$

Полезный момент на валу двигателя, Н·м:

$$M_2 = \frac{60 \cdot P_2}{2\pi \cdot n}. \quad (13.18)$$

По результатам расчётов строят рабочие характеристики.

14 Тепловой и вентиляционный расчёт двигателя

Преобразование энергии в электрической машине постоянного тока сопровождается преобразованием электрической и механической энергии в тепло, представляющее собой потери энергии. Такими потерями являются электрические потери мощности в проводниках обмоток и щёточном контакте, потери мощности на перемагничивание и вихревые токи, потери на трение и вентиляцию.

Потери мощности в форме тепловых потоков, начинаясь внутри твёрдых тел, составляющих активную часть машины постоянного тока, частично расходуются на изменение теплосодержания частей машины (в нестационарном тепловом режиме) и передаются путём теплопроводности в направлении менее нагретых тел и к поверхностям охлаждения, где посредством теплообмена передаются в охлаждающую среду. Охлаждающая среда под воздействием нагнетательных элементов циркулирует вдоль поверхностей охлаждения.

Предельная длительно допустимая температура отдельных частей машины определяется изоляционными материалами, использованными в конструкции машины. Одним из важнейших факторов, определяющих условия применения изоляции является нагревостойкость, т. е. способность изоляционного материала выполнять свои функции при воздействии рабочей температуры в течение расчётного срока службы при условии нормальной эксплуатации.

Согласно стандарту МЭК, для определения нагревостойкости введена характеристика, называемая температурным индексом (ТИ). Под температурным индексом понимается температура, при которой срок службы изоляционного материала равен 20000 часов.

Измерение температуры может производиться методом термометра, методом сопротивления и методом температурных индикаторов. Методы измерения температур не дают возможности определять температуру в наиболее нагретой точке обмотки. Поэтому пределы температуры в обмотках, определяемые ГОСТ 183-74, ниже длительно допустимых температур для изоляционных материалов (таблица 14.1).

Температура отдельных частей машины зависит не только от потерь мощности и системы охлаждения, но и от температуры охлаждающей среды, для которой характерны колебания температуры. По этой причине при выполнении тепловых расчётов принято определять средние значения превышения температуры отдельных частей машины над температурой охлаждающей среды:

$$\Delta\Theta = \Theta - \Theta_{охл} \quad (14.1)$$

Номинальные данные машины постоянного тока относятся к её работе на высоте до 1000 м над уровнем моря при температуре газообразной охлаждающей среды до 40°C ($\Theta_{охл} = 40^{\circ}\text{C}$).

Таблица 14.1

Температурный индекс	<i>ТИ 130</i>	<i>ТИ 155</i>	<i>ТИ 180</i>
Класс нагревостойкости	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
Предельно допустимая температура для изоляционного материала	130° C	155° C	180° C
Предельно допустимая (средняя) температура обмоток электрических машин по <i>ГОСТ 183 – 74</i>	120° C	140° C	165° C
Предельно допускаемые (средние) превышения температуры обмоток	80° C	100° C	125° C

Тепловой расчёт машины постоянного тока выполняется с целью оценки её тепловой загрузки при выбранных электромагнитных нагрузках и размерах отдельных частей машины. Для приближённой оценки тепловой напряжённости машины используют приближённую методику теплового расчёта.

В ходе теплового расчёта определяют средние значения превышения температуры обмотки якоря, обмотки возбуждения, обмотки добавочных полюсов и коллектора над температурой охлаждающей среды. Расчётные значения превышения температуры, с учётом использования приближённой методики расчёта, должны быть ниже допустимых значений не менее чем на 10 %.

При расчёте средних значений превышения температуры над температурой охлаждающей среды потери мощности в обмотках машины определяют при предельной допустимой температуре для класса нагревостойкости выбранного изоляционного материала. Для этого сопротивления обмоток, определённые для расчётной температуры, пересчитывают на предельную допустимую температуру с помощью поправочного коэффициента k_r . При классе нагревостойкости изоляции *B* $k_r = 1,15$, при классе нагревостойкости *F* $k_r = 1,07$, при классе нагревостойкости *H* $k_r = 1,07$.

Потери мощности в обмотках с учётом поправочного коэффициента k_r составляют:

- в обмотке якоря

$$P_{am} = I_{2n}^2 \cdot r_{a\theta} \cdot k_r; \quad (14.2)$$

- в стабилизирующей обмотке

$$P_{cm} = I_{2n}^2 \cdot r_{c\theta} \cdot k_r; \quad (14.3)$$

- в обмотке добавочных полюсов

$$P_{dm} = I_{2n}^2 \cdot r_{d\theta} \cdot k_r; \quad (14.4)$$

- в обмотке возбуждения

$$P_{\text{в}т} = I_{\text{вн}}^2 \cdot r_{\text{в}т} \cdot k_r. \quad (14.5)$$

Если в формуле (14.5) произведение $I_{\text{вн}} \cdot r_{\text{в}т} \cdot k_r$ окажется больше номинального напряжения возбуждения, то потери мощности в обмотке возбуждения следует определить по номинальному напряжению и номинальному току возбуждения:

$$P_{\text{в}т} = I_{\text{вн}} \cdot U_n. \quad (14.6)$$

Для расчёта потерь мощности, отводимых охлаждающим внутренними объёмами машины воздухом, принимают, что через внешнюю поверхность машины отводится часть потерь в обмотках возбуждения, добавочных полюсов и стабилизирующей обмотке:

- при исполнениях по степени защищённости *IP22* и *IP44* и способах охлаждения *IC01*, *IC17*, *IC37*

$$P_{\text{вн}} = 0,1 \cdot (P_{\text{в}т} + P_{\text{с}т} + P_{\text{д}т}); \quad (14.7)$$

- при исполнении *IP44* и способе охлаждения *IC0041*

$$P_{\text{вн}} = 0,3 \cdot (P_{\text{в}т} + P_{\text{с}т} + P_{\text{д}т}); \quad (14.8)$$

при исполнении *IP44* и способе охлаждения *IC0141*

$$P_{\text{вн}} = 0,4 \cdot (P_{\text{в}т} + P_{\text{с}т} + P_{\text{д}т}). \quad (14.9)$$

Соответственно, потери мощности $P'_{iт}$, отводимые охлаждающим воздухом из внутреннего объёма через поверхность охлаждения i – обмотки возбуждения, стабилизирующей обмотки и обмотки добавочных полюсов, в зависимости от исполнения машины по степени защиты и способу охлаждения, согласно (14.7) – (14.9), составят $0,9 \cdot P_{iт}$, $0,7 \cdot P_{iт}$, $0,6 \cdot P_{iт}$.

Потери мощности, отводимые воздухом из внутреннего объёма машины

$$\sum P' = p_{\Sigma} - P_{\text{вн}}, \quad (14.10)$$

где

$$p_{\Sigma} = P_{aт} + P_{ст} + P_{дт} + P_{\text{э}ц} + P_{\text{в}т} + P_{\text{с}т} + P_{\text{тр}ц} + P_{\text{мех}} + P_{\text{вент}} + P_{\text{доб}}, \quad (14.11)$$

а при исполнении по степени защищённости *IP44*

$$P_{\Sigma} = P_{am} + P_{cm} + P_{dm} + P_{эц} + P_{em} + P_{cm} + P_{трц} + P_{доб}. \quad (14.12)$$

Площадь условной поверхности охлаждения якоря при аксиальной вентиляции, м^2 ,

$$S_a = (\pi \cdot D + n_k \cdot d_k) \cdot (l_2 - 0,5 \cdot \sum l_{\bar{o}}), \quad (14.13)$$

где n_k, d_k – число и диаметр осевых вентиляционных каналов в магнитопроводе якоря;

$\sum l_{\bar{o}} \approx 0,3 \cdot l_2$ – общая длина бандажа по длине магнитопровода якоря.

Площадь расчётной поверхности пазов якоря, м^2 :

$$S_n = \Pi \cdot z_2 \cdot l_{\delta} \cdot k_c, \quad (14.14)$$

где Π – периметр паза, м.

Периметр поперечного сечения овального полузакрытого паза якоря

$$\Pi = \pi \cdot (r_1 + r_2) + 2h_1. \quad (14.15)$$

Периметр поперечного сечения открытого прямоугольного паза якоря

$$\Pi = 2 \cdot (b_{n2} + h_{n2}). \quad (14.16)$$

Условная поверхность охлаждения лобовых частей обмотки якоря, м^2 :

- при отсутствии аксиальных вентиляционных каналов

$$S_{\text{л}} = 2\pi \cdot D \cdot (l_{\text{был}} - 0,3 \cdot l_{\bar{o}\text{л}}); \quad (14.17)$$

- при наличии аксиальных вентиляционных каналов

$$S_{\text{л}} = 3\pi \cdot D \cdot (l_{\text{был}} - 0,3 \cdot l_{\bar{o}\text{л}}), \quad (14.18)$$

где $l_{\bar{o}\text{л}} \approx 0,3 \cdot l_2$ – общая длина бандажа по длине лобовой части обмотки якоря (уточняется в ходе механических расчётов).

Площадь условной поверхности охлаждения обмотки возбуждения, м^2

$$S_{\text{в}} = \Pi_{\text{в}} \cdot l_{\text{вср}}, \quad (14.19)$$

где $l_{\text{вср}}$ – средняя длина витка обмотки возбуждения, м;

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

Для определения периметра Π_e по эскизу междуполюсного окна определяют сумму длин участков контура поперечного сечения. Поверхности, прилегающие к сердечнику полюса, не учитывают. Поверхности, обращённые к каналам шириной менее 6 мм, учитывают с коэффициентом 0,5. Поверхности, закрытые изоляционными рамками, учитывают с коэффициентом 0,3.

Площадь условной поверхности охлаждения обмотки добавочных полюсов, м^2 :

$$S_{\partial} = \Pi_{\partial} \cdot l_{\partial \text{cp}}, \quad (14.20)$$

где $l_{\partial \text{cp}}$ – средняя длина витка обмотки добавочного полюса, м;

Π_e – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения катушки добавочного полюса, м. Определяют так же, как для обмотки возбуждения.

Площадь условной поверхности охлаждения коллектора, м^2 :

$$S_{\text{кол}} = \pi \cdot D_{\kappa} \cdot l_{\kappa}. \quad (14.21)$$

Расчётная площадь поверхности охлаждения двигателя, м^2 :

$$S_{\text{охл}} = \pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot (l_{\delta} + 2l_{\text{выл}}), \quad (14.22)$$

где $D_{\text{вн}}$ – внешний диаметр станины, м;

$l_{\text{выл}}$ – длина вылета лобовой части обмотки якоря, м.

Превышение температуры поверхности магнитопровода якоря над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$:

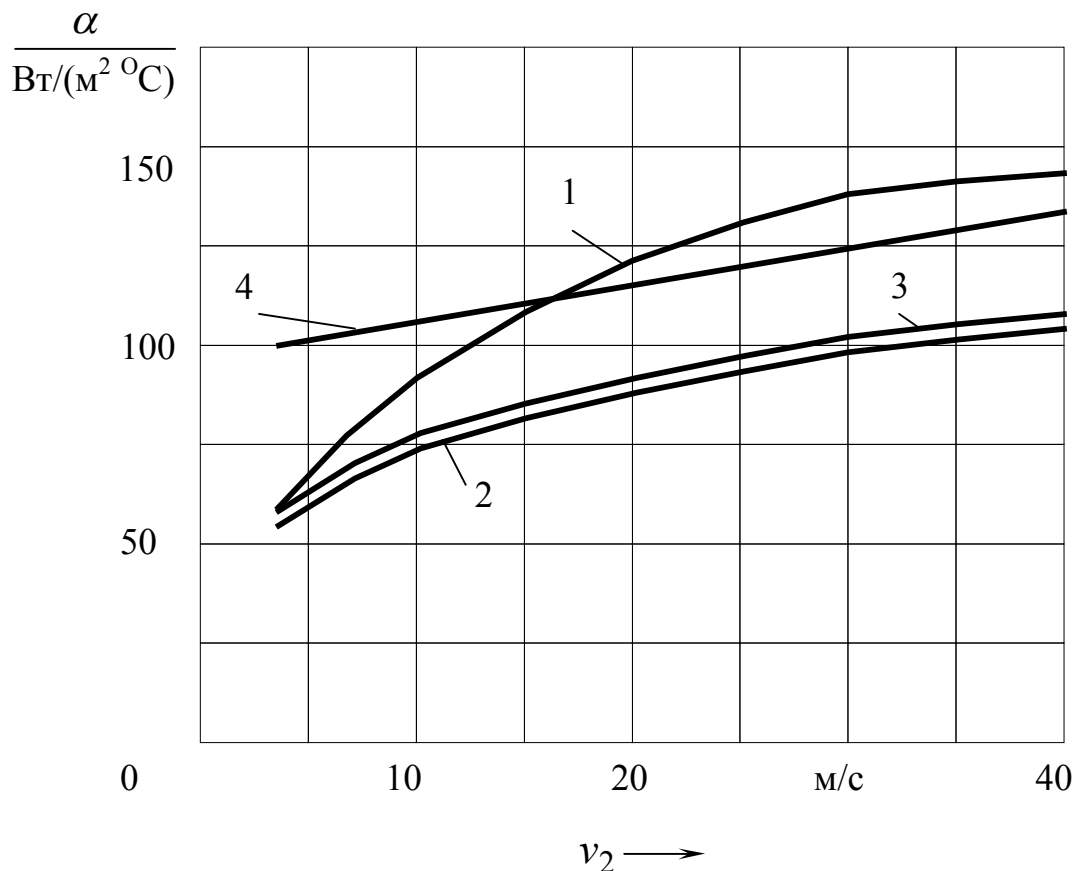
$$\Delta\theta_a = \frac{P_{\text{ам}} \cdot \left(\frac{2 \cdot l_2}{l_{\text{cp}}} \right) + P_{\text{см}}}{S_a \cdot \alpha_a}, \quad (14.23)$$

где α_a – коэффициент теплоотдачи с поверхности магнитопровода якоря. Определяется по рисунку 14.1.

Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки якоря над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta\theta_{\text{нов л}} = \frac{P_{\text{ам}} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot l_2}{l_{\text{cp}}} \right)}{S_{\text{л}} \cdot \alpha_{\text{л}}}, \quad (14.24)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности лобовых частей обмотки якоря. Определяется по рисунку 14.1.



- 1 – исполнение по защите *IP22*, способ охлаждения *IC01*, полузакрытые пазы якоря;
- 2 – то же, что и 1, но открытые пазы якоря;
- 3 – исполнение по защите *IP44*, способ охлаждения *IC0141* или *IC0041*, полузакрытые пазы якоря;
- 4 – исполнение по защите *IP22* и *IP44*, способ охлаждения *IC17* или *IC37*, открытые пазы якоря

Рисунок 14.1 – Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности якоря и лобовых частей обмотки якоря

Перепад температуры в изоляции паза и проводов для овальных полузакрытых пазов, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta\theta_{\text{изн}} = \frac{P_{\text{ам}} \cdot \left(\frac{2 \cdot l_2}{l_{\text{асп}}} \right)}{S_n} \left(\frac{r_1 + r_2}{8 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} + \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экв}}} \right), \quad (14.25)$$

где $\lambda'_{\text{эКВ}} \approx 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С})$ – эквивалентная теплопроводность внутренней изоляции секции из круглого провода;

$\lambda_{\text{эКВ}} = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С})$ – эквивалентная теплопроводность изоляции для классов нагревостойкости B, F, H .

Перепад температуры в изоляции паза для открытых прямоугольных пазов, $^\circ \text{С}$:

$$\Delta\theta_{\text{из п}} = \frac{P_{\text{ам}} \cdot \left(\frac{2 \cdot l_2}{l_{\text{асп}}} \right) \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{эКВ}}}}{S_{\text{п}}}. \quad (14.26)$$

Перепад температуры в изоляции катушек и проводов лобовых частей обмотки якоря, $^\circ \text{С}$:

$$\Delta\theta_{\text{из л}} = \frac{P_{\text{ам}} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot l_2}{l_{\text{асп}}} \right)}{S_{\text{л}}} \left(\frac{h_{\text{н2}}}{8 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} + \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} \right), \quad (14.27)$$

где $h_{\text{н2}}$ – высота паза, м.

Для якорей с жёсткими секциями из прямоугольного провода $\frac{h_{\text{н2}}}{8 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \approx 0$. Для якорей с обмотками из круглого провода без общей изоляции лобовых частей $\frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} \approx 0$.

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой наружного охлаждающего воздуха, $^\circ \text{С}$:

$$\Delta\theta_{\text{воз}} = \frac{\sum P'}{S_{\text{охл}} \cdot \alpha_{\text{н}}}, \quad (14.28)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент подогрева воздуха. Определяется по рисунку 14.2 или 14.3.

Среднее значение превышения температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды, $^\circ \text{С}$:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{\text{асп}} = & (\Delta\theta_{\text{а}} + \Delta\theta_{\text{из п}}) \frac{2 \cdot l_2}{l_{\text{асп}}} + (\Delta\theta_{\text{нов л}} + \Delta\theta_{\text{из л}}) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot l_2}{l_{\text{асп}}} \right) + \\ & + \frac{\Delta\theta_{\text{воз}}}{100}. \end{aligned} \quad (14.29)$$

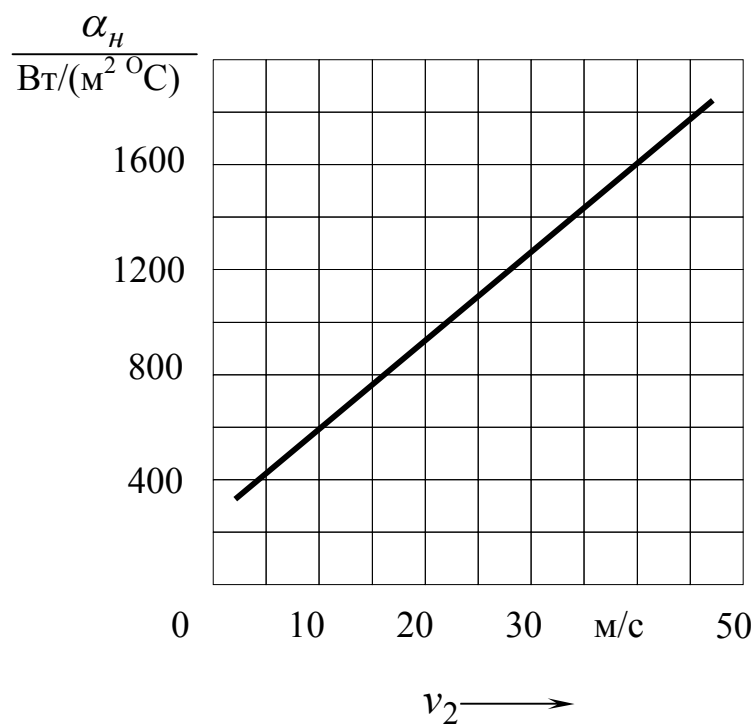


Рисунок 14.2 – Минимальное значение коэффициента подогрева воздуха при исполнении по защите *IP22* (способы охлаждения *IC01* и *IC37*) и *IP44* (способ охлаждения *IC37*) при $D_{вн} < 0,6$ м

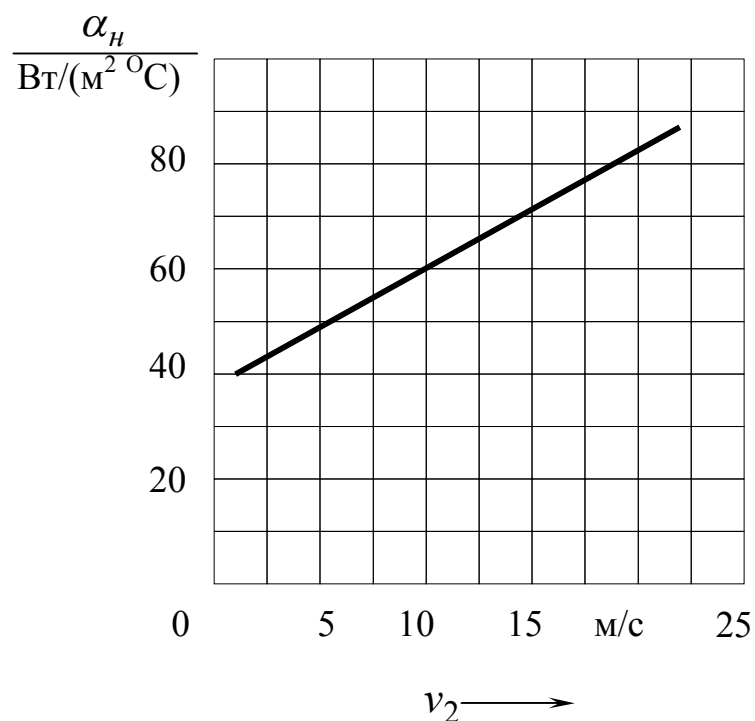
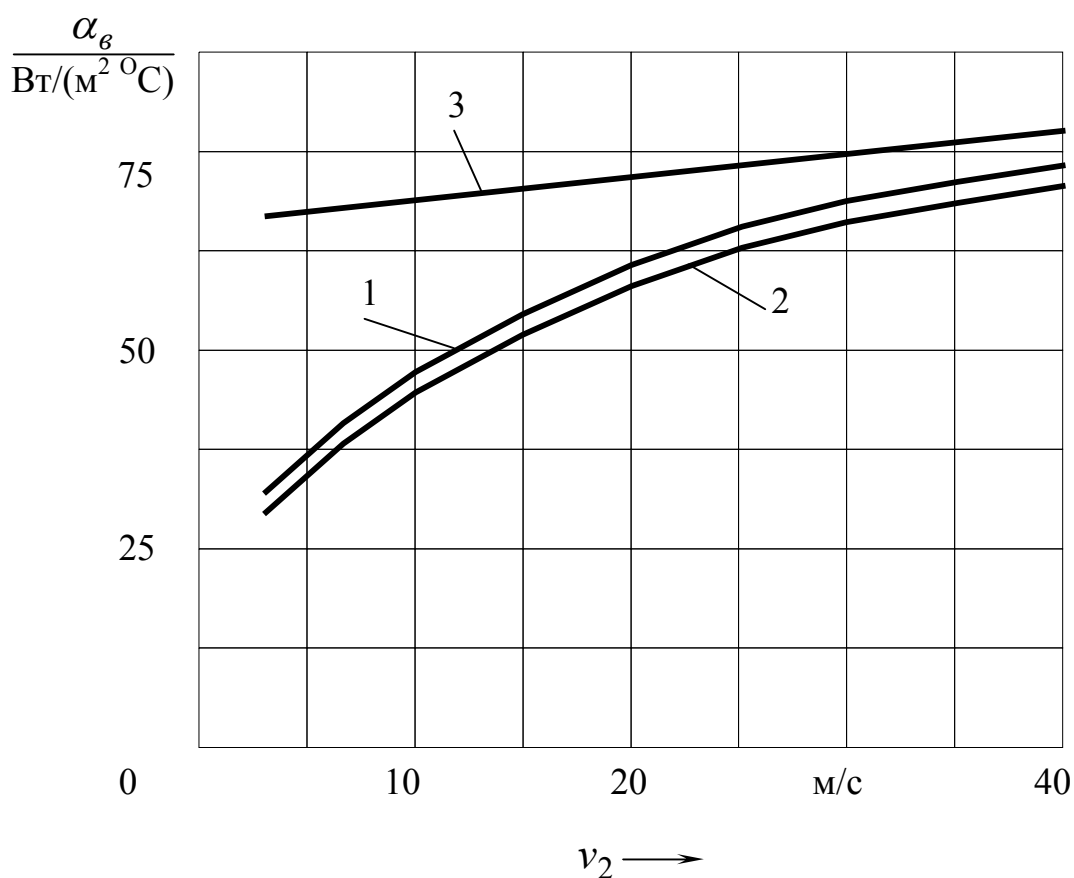


Рисунок 14.3 – Минимальное значение коэффициента подогрева воздуха при исполнении по защите *IP44* (способ охлаждения *IC0141*) при $D_{вн} < 0,22$ м

Превышение средней температуры наружной поверхности охлаждения обмотки возбуждения над температурой воздуха внутри машины, °C :

$$\Delta\theta_{\theta} = \frac{P'_{\theta}}{2p \cdot S_{\theta} \cdot \alpha_{\theta}}, \quad (14.30)$$

где α_{θ} – коэффициент теплоотдачи с поверхности охлаждения обмотки возбуждения. Определяется по рисунку 14.4.



- 1 – исполнение по защите *IP22*, способ охлаждения *IC01*;
- 2 – исполнение по защите *IP44*, способ охлаждения *IC0141* или *IC0041*;
- 3 – исполнение по защите *IP22* или *IP44*, способ охлаждения *IC17* или *IC37*

Рисунок 14.4 - Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности обмотки возбуждения и добавочных полюсов

Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции обмотки возбуждения, °C :

$$\Delta\theta_{из\ в} = \frac{P'_6}{2p \cdot S_6} \left(\frac{b_6}{8 \cdot \lambda'_{экв}} + \frac{b_{из\ в}}{\lambda_{экв}} \right), \quad (14.31)$$

где $b_{из\ в}$ – односторонняя толщина изоляции катушки, м;

b_6 – средняя ширина катушки, м. Определяется по эскизу междуполюсного окна.

Среднее значение превышения температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающего воздуха вне машины, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta\theta_{в\ ср} = \Delta\theta_6 + \Delta\theta_{из\ в} + \Delta\theta_{воз}. \quad (14.32)$$

Превышение средней температуры наружной поверхности охлаждения обмотки добавочных полюсов над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta\theta_{n\ \partial} = \frac{P'_{\partial m}}{2p_{\partial} \cdot S_{\partial} \cdot \alpha_{\partial}}, \quad (14.33)$$

где α_{∂} – коэффициент теплоотдачи с поверхности охлаждения добавочного полюса. Определяется по рисунку 14.4.

Перепад температуры в наружной и внутренней изоляции многослойных катушек обмотки добавочных полюсов из изолированного провода, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta\theta_{из\ \partial} = \frac{P'_{\partial m}}{2p_{\partial} \cdot S_{\partial}} \left(\frac{b_{км\ \partial}}{8 \cdot \lambda'_{экв}} + \frac{b_{из\ \partial}}{\lambda_{экв}} \right), \quad (14.34)$$

где $b_{км\ \partial}$ – ширина катушки, м. Определяется по эскизу междуполюсного окна;

$b_{из\ \partial}$ – односторонняя толщина изоляции катушки, м.

Коэффициенты теплопроводности изоляции $\lambda'_{экв}$ и $\lambda_{экв}$ принимают такими же, как и для обмотки якоря.

Среднее значение превышения температуры многослойных катушек добавочных полюсов над температурой охлаждающего воздуха вне машины, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta\theta_{\partial\ ср} = \Delta\theta_{n\ \partial} + \Delta\theta_{из\ \partial} + \Delta\theta_{воз}. \quad (14.35)$$

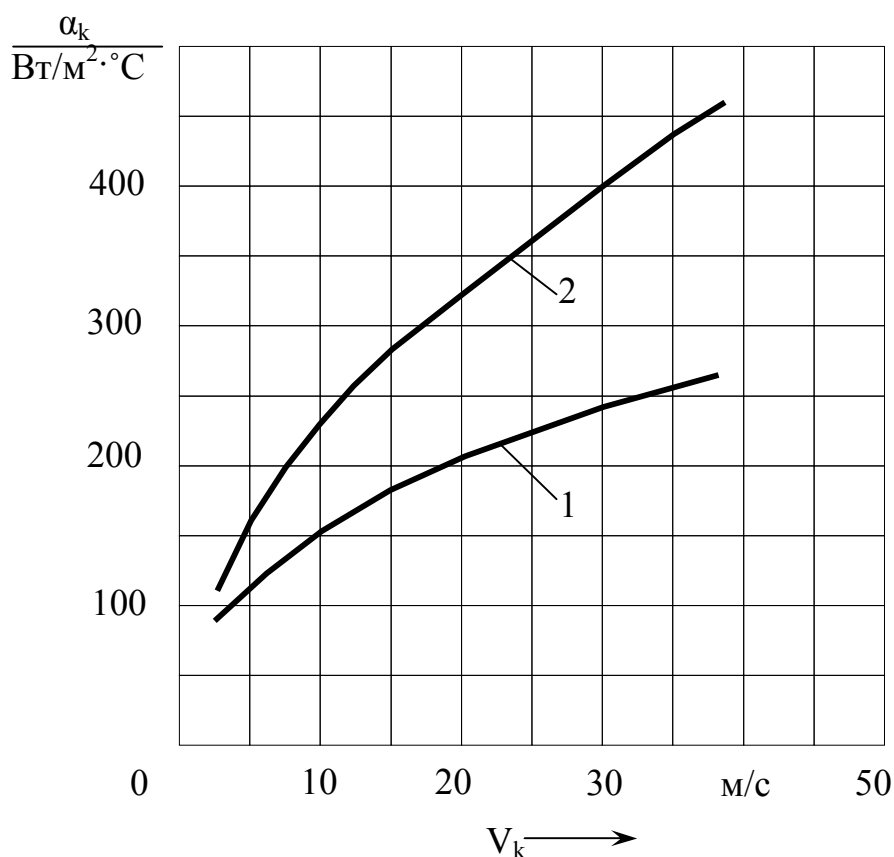
Среднее значение превышения температуры над температурой наружного охлаждающего воздуха для катушек добавочных полюсов, выполненных из голой шинной меди, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta\theta_{\partial cp} = \Delta\theta_{n\partial} + \Delta\theta_{\partial\partial\partial}. \quad (14.36)$$

Среднее значение превышения температуры поверхности коллектора над температурой воздуха внутри машины, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta\theta_{\kappa} = \frac{P_{\text{эц}} + P_{\text{тц}}}{S_{\kappa} \cdot \alpha_{\kappa}}, \quad (14.37)$$

где α_{κ} – коэффициент теплоотдачи с поверхности коллектора. Определяется по рисунку 14.5.



- 1 – коллекторы без аксиальных каналов;
2 – коллекторы с аксиальными каналами

Рисунок 14.5 – Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности коллектора

Превышение температуры коллектора над температурой наружного охлаждающего воздуха для машин:

- со степенью защиты и способами охлаждения *IP22; IC01; IP22; IC17; IP44; IC37* со входом охлаждающего воздуха со стороны коллектора

$$\Delta\theta_{кр} = \Delta\theta_k; \quad (14.38)$$

- со степенью защиты и способами охлаждения *IP22; IC01; IP22; IC17; IP44; IC37* с входом охлаждающего воздуха со стороны, противоположной коллектору

$$\Delta\theta_{кр} = \Delta\theta_k + 2 \cdot \Delta\theta_{воз}; \quad (14.39)$$

- со степенью защиты *IP44* и способами охлаждения *IC0141* и *IC0041*

$$\Delta\theta_{кр} = \Delta\theta_k + \Delta\theta_{воз}. \quad (14.40)$$

Расход воздуха, необходимый для охлаждения машины, м³/с :

$$Q_{воз} = \frac{\sum P'}{1100 \cdot 2 \cdot \Delta\theta_{воз}}, \quad (14.41)$$

где $2 \cdot \Delta\theta_{воз}$ – превышение температуры выходящего из машины воздуха над входящим, °C.

Давление вентилятора, необходимое для обеспечения требуемого расхода воздуха, Па:

$$H = Z \cdot Q_{воз}^2, \quad (14.42)$$

где Z – эквивалентное аэродинамическое сопротивление вентиляционного тракта машины. Выбирается по рисунку 14.6.

Для центробежного вентилятора, у которого вентиляционные лопасти расположены радиально, характеристика вентилятора выражается, приближённо, зависимостью

$$H = H_o \cdot \left[1 - \left(\frac{Q_{воз}}{Q_{o\,воз}} \right)^2 \right], \quad (14.43)$$

где H_o – напор вентилятора при закрытом входном отверстии $Q_{воз} = 0$ (холостой ход вентилятора);

$Q_{o\text{воз}}$ - максимальное возможное количество воздуха, обеспечиваемое вентилятором, при $H = 0$, т.е. при работе вентилятора, непосредственно, в окружающую среду (короткое замыкание вентилятора).

При аксиальной системе вентиляции наружный диаметр центробежного вентилятора равен

$$D_2 \approx 0,9 \cdot D_{\text{вн}}, \quad (14.44)$$

где $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр станины, м.

Внутренний диаметр вентилятора, м:

$$D_1 \approx (1,25 \dots 1,3) \cdot D. \quad (14.45)$$

Ширина лопасти вентилятора, м:

$$b_{\text{лв}} = (0,12 \dots 0,14) \cdot D. \quad (14.46)$$

Число лопаток вентилятора:

$$N_{\text{л}} \approx \frac{D_2}{20} \cdot 10^3. \quad (14.47)$$

Для уменьшения вентиляционного шума число лопаток следует округлить до ближайшего простого числа.

Окружная скорость по внешнему диаметру центробежного вентилятора, м/с:

$$v_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n_{\text{н}}}{60}. \quad (14.48)$$

Окружная скорость по внутреннему диаметру вентилятора, м/с:

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n_{\text{н}}}{60}. \quad (14.49)$$

Давление, создаваемое вентилятором в режиме холостого хода, Па:

$$H_o = \eta_{\text{с}} \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2), \quad (14.50)$$

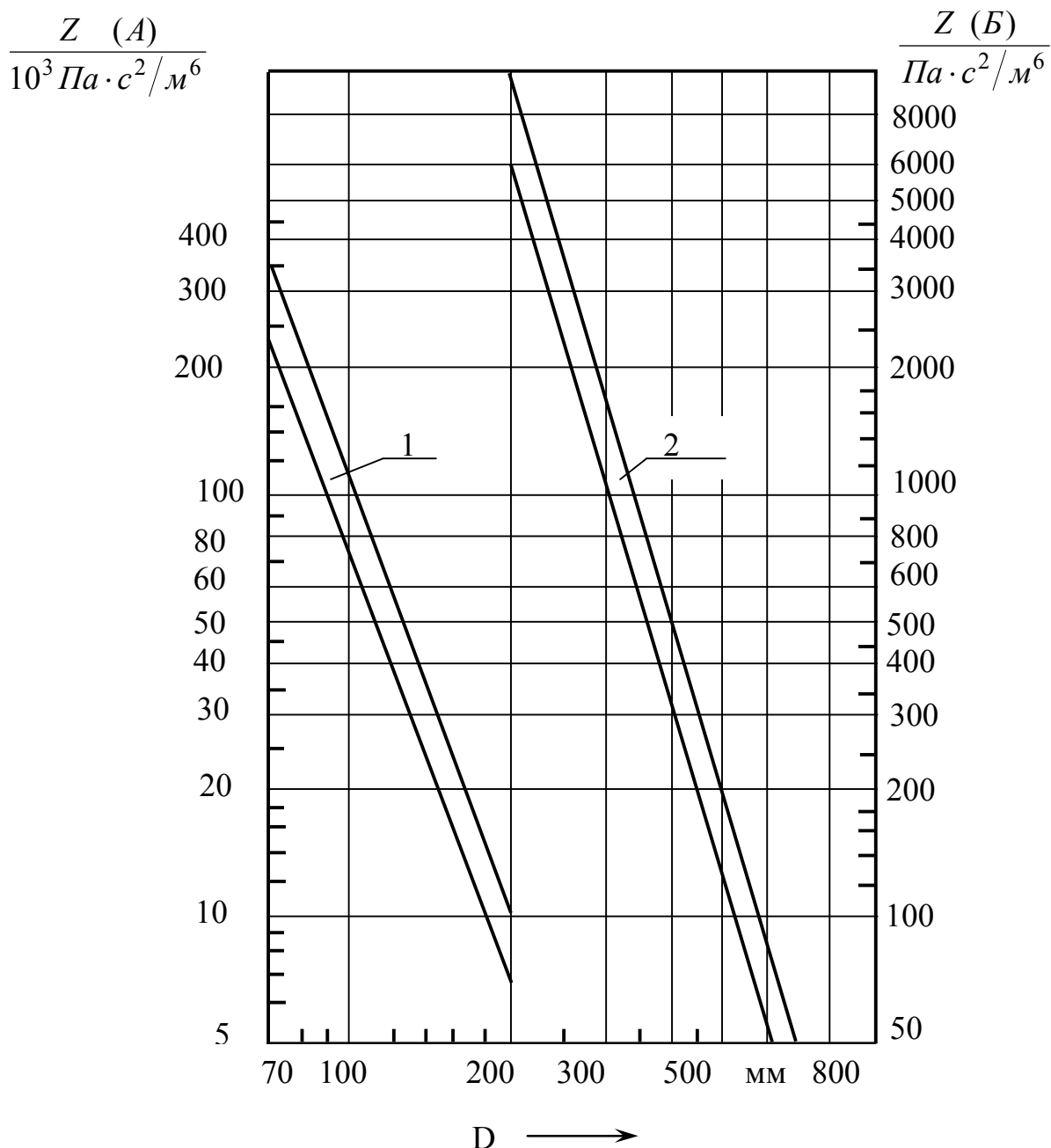
где $\eta_{\text{с}} \approx 0,6$ – аэродинамический коэффициент полезного действия вентилятора в режиме холостого хода, учитывающий потери давления в самом вентиляторе;

$\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность воздуха.

Максимальное возможное количество воздуха в режиме короткого замыкания, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q_{в\max} = 0,42 \cdot v_2 \cdot S_2, \quad (14.51)$$

где $S_2 = 0,92 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot b_{лв}$ – входное сечение вентилятора, м^2 .



1 – для машин без аксиальных каналов (А);
2 – для машин с аксиальными каналами (Б).

Рисунок 14.6 - Эквивалентное аэродинамическое сопротивление вентиляционного тракта машины

Действительный расход воздуха, обеспечиваемый вентилятором, м³:

$$Q_{\text{воз}} = Q_{\text{в max}} \cdot \sqrt{\frac{H_o}{H_o + Z \cdot Q_{\text{в max}}^2}}. \quad (14.52)$$

Мощность, потребляемая вентилятором, Вт:

$$P_{\text{вен}} = \frac{H \cdot Q_{\text{воз}}}{\eta_{\text{э}}}, \quad (14.53)$$

$\eta_{\text{э}} \approx 0,18...0,20$ – энергетический коэффициент полезного действия вентилятора.

15 Требования к оформлению пояснительной записки

Пояснительная записка к курсовому проекту оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95 и СТП 101-00. Пояснительная записка должна иметь следующую структуру:

- титульный лист. Пример выполнения титульного листа представлен в приложении Ж;
- техническое задание. Пример оформления листа «Техническое задание» представлен в приложении И;
- лист «Аннотация» к курсовому проекту с основной надписью для текстовых документов. Это третий лист пояснительной записки и первый лист, на котором проставляется порядковый номер страницы (третья), приложение К;
- содержание;
- введение;
- анализ технического задания и выбор базовой модели двигателя. Это первый раздел пояснительной записки;
- разделы и подразделы пояснительной записки, содержащие электромагнитный, тепловой и вентиляционный расчёты двигателя постоянного тока. Названия разделов могут соответствовать названию разделов данного пособия;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения. Приложения могут отсутствовать.

Пояснительная записка к курсовому проекту выполняется на листах формата А4 рукописным способом чертёжным шрифтом по ГОСТ 2.304 с высотой букв и цифр не менее 2,5 мм. Расстояние между строчками не менее 8 мм. Буквы и цифры необходимо писать только чёрной тушью или шариковой ручкой с чёрной пастой. По согласованию с руководителем курсового проектирования пояснительная записка может выполняться машинным способом.

На всех листах пояснительной записки, кроме второго, тушью или шариковой ручкой выполняется рамка. Расстояние от рамки до края листа сверху, снизу и справа должно быть равно пяти миллиметрам, а слева – двадцати миллиметрам. Начиная с четвёртого листа, в правом нижнем углу выполняется штамп для указания номера страницы с размерами 10×15 мм. По высоте штамп подразделяется горизонтальной линией на две части. Верхняя часть составляет 7 мм, а нижняя - 8 мм. В верхней части штампа записывают слово «лист», а в нижней проставляют номер страницы.

Расстояние от рамки до границ текста в начале и в конце строк – не менее 3 мм. Расстояние до верхней строки текста от рамки должно быть не менее 10 мм, а от нижней строки текста до рамки – не менее 15 мм.

Абзацы в тексте начинают отступом, равным 15 – 17 мм.

Пояснительная записка к курсовому проекту разделяется на разделы и может содержать подразделы. Номер раздела обозначают арабской цифрой без точки и записывают с абзацевого отступа. За номером раздела записывают его название, начиная с прописной буквы. В конце названия раздела точка не ставится. Переносы и сокращения в названиях разделов не допускаются.

Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и номера подраздела, разделённых точкой. После номера подраздела и в конце его названия точка не ставится.

Рекомендуется разделы начинать с новой страницы. Подразделы и (разделы) могут оформляться как продолжение текста на данной странице, если имеется достаточно места для записи названия подраздела (раздела) и не менее трёх строк текста.

При оформлении пояснительной записки вручную разделы и подразделы выделяются только увеличением расстояния между строчками до 13 – 15 мм.

Слова «Содержание», «Введение», «Выводы» и заголовок «Список использованных источников», не являющиеся названием разделов, центрируются по ширине листа и записываются с прописной буквы. В конце заголовка точка не ставится.

При оформлении пояснительной записки не допускается:

- применять обороты разговорной речи;
- применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии и соответствующими государственными стандартами.

В тексте пояснительной записки, за исключением формул, таблиц и рисунков, не допускается:

- применять без числовых значений математические знаки, например > (больше), = равно и т.д., а также знаки № (номер), % (процент);
- применять индексы стандартов, технических условий без регистрационного номера.

При оформлении результатов расчёта формулу записывают в общем виде. Если в этой формуле есть величины, которые встретились в первый раз, то после формулы даётся их расшифровка с указанием единицы измерения. Затем запись формулы повторяют, заменяя все величины в правой части на их число-

вые значения. Записывают конечный результат вычисления с указанием единицы измерения. Результаты вычисления линейных размеров, значением до ста миллиметров, должны быть записаны в миллиметрах и умножены на десять в минус третьей степени. Например:

$$t_k = \frac{\pi \cdot D_k}{K}, \quad (15.1)$$

где D_k – диаметр коллектора, м;
 K – число коллекторных пластин.

$$t_k = \frac{\pi \cdot 0,125}{87} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Формулы, записанные в общем виде, нумеруются. Нумерация формул может быть сквозной и по разделам. Формулы, записанные в общем виде и с числовыми значениями в правой части, центрируются по ширине строки.

Примером для оформления иллюстраций и таблиц могут служить рисунки и таблицы, представленные в основном тексте и в приложениях данного учебного пособия.

16 Подготовка к защите курсового проекта

Защите курсового проекта предшествует подготовительная работа.

Оформленная пояснительная записка и графическая часть проекта, подписанные исполнителем курсового проекта, представляются на проверку руководителю. Руководитель подписывает пояснительную записку и чертежи после устранения всех замечаний.

Следующий этап подготовки к защите проекта - это прохождение нормоконтроля на кафедре электромеханики. Нормоконтролёр проверяет оформление курсового проекта на соответствие требованиям действующих стандартов. Пояснительная записка и графическая часть проекта подписываются после устранения всех замечаний нормоконтролёра.

На заключительном этапе курсовой проект представляется заведующему кафедрой электромеханики для утверждения проекта и определения срока защиты.

Процедура защиты проекта включает доклад на 8 – 10 минут и ответы на возникшие вопросы по теме курсового проекта.

Доклад, по его содержанию, условно может быть подразделён на три части. В первой части (1 – 2 минуты) необходимо представить машину, проект которой выносится на защиту, и требования к её характеристикам, а также характеризовать условия выполнения расчётов (работы выполняются вручную или с использованием ЭВМ).

В основной части доклада (6 – 8 минут) необходимо дать краткую характеристику решений, принятых при проектировании двигателя постоянного тока. Во время доклада необходимо ссылаться на чертежи и плакаты, представленные к защите.

В заключительной части доклада необходимо кратко дать характеристику проекта двигателя постоянного тока на соответствие его характеристик требованиям технического задания, условиям работоспособности и отметить, какие знания и умения получены в результате работы над проектом.

Текст доклада целесообразно согласовать с руководителем проекта.

Для подготовки к защите курсового проекта необходимо повторить теоретический материал по вопросам теории и проектирования машин постоянного тока, рассмотренный в курсах «Электрические машины» и «Инженерное проектирование и САПР электрических машин»

Перечень контрольных вопросов:

- Чем Вы руководствовались, выбирая конкретные значения линейной токовой нагрузки и магнитной индукции в воздушном зазоре?
- Какую сталь Вы выбрали для изготовления магнитопровода якоря, сердечников главных и добавочных полюсов, чем Вы руководствовались?
- Обоснуйте выбор конфигурации пазов якоря.
- Как изолируется обмотка якоря?
- С какой целью производится пропитка обмоток машины постоянного тока?
- С какой целью магнитопровод якоря выполняют шихтованным? С какой целью сердечники главных полюсов выполняют шихтованными?
- Чем Вы руководствовались, выбирая число и размеры элементарных проводников обмотки якоря?
- Чем Вы руководствовались, оценивая результаты проектирования зубцовой зоны и обмотки якоря?
- Чем Вы руководствовались, выбирая число пазов на роторе?
- С какой целью на роторе выполнен скос пазов?
- Какую особенность Вы учитывали, определяя магнитное напряжение воздушного зазора?
- По каким показателям Вы определяли, что размеры магнитной цепи и магнитные нагрузки выбраны удачно?
- Для каких значений температуры Вы рассчитывали активные сопротивления обмоток машины? С какой целью?
- Какой способ пуска Вы рекомендуете для двигателя постоянного тока, проект которого представлен к защите?
- Какие меры предусмотрены в проекте двигателя постоянного тока для решения проблемы реакции якоря?
- Какие меры предусмотрены для решения проблемы коммутации?
- Каковы причины искрения на коллекторе и какие из этих причин Вы учитывали при решении проблемы реакции якоря?
- Почему обмотка добавочных полюсов (и стабилизирующая обмотка) включены последовательно в цепь якоря?

- С какой целью зазор между добавочным полюсом и якорем выбран больше, чем между главным полюсом и якорем?
- Что Вы определяли в ходе вентиляционного расчёта?
- Благодаря чему и по каким направлениям происходит передвижение охлаждающего агента?
- Какие силы действуют на вал ротора?
- В чём заключается механический расчёт вала?
- По каким показателям Вы выбирали подшипники?
- Как направлены силы, действующие на вал ротора?
- Где приложена поперечная сила, действующая на выступающий конец вала?

Список использованных источников

- 1 **Копылов И.П.**, Проектирование электрических машин: учеб. для вузов/И. П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова.- 3-е изд., испр. и доп. - М.: Высш. шк., 2002.- 757 с.: ил.
- 2 **Гольдберг О.Д.**, Проектирование электрических машин/Гольдберг О.Д., Гурин Я. С., Свириденко И. С.; под ред. О. Д. Гольдберга. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 2001. - 430 с.
- 3 **Кожевников В.А.**, Развитие теории и конструкции машин постоянного тока/Кожевников В.А., Копылов И.П. - Л.: Наука, 1985.-147 с.
- 4 **Гурин Я. С.**, Проектирование серий электрических машин/Гурин Я. С., Кузнецов Б. И. - М.: Энергия, 1978. - 480 с.
- 5 **Копылов И.П.**, Проектирование электрических машин: учеб. для вузов.-В 2-х кн.: кн. 2/И. П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова.- 2-е изд., перераб. и доп.-М.: Энергоатомиздат, 1993.- 384 с.
- 6 **Бородулин Ю. Б.**, Автоматизированное проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов/Ю. Б. Бородулин, В. С. Мостейкис, Г. В. Попов, В. П. Шишкин; под ред. Ю. Б. Бородулина. - М.: Высшая школа, 1989. - 280 с.
- 7 **Кацман М.М.**, Расчёт и конструирование электрических машин. - М.:Энергоатомиздат, 1984.- 360 с.
- 8 **Кутарёв А.М.**, Механические расчёты элементов конструкции электрических машин: учебное пособие/Кутарёв А.М., Огорелкова Н.И. – Оренбург: ОГУ, 2000. – 112с.
- 9 **Копылов И.П.**, Справочник по электрическим машинам: В 2-х т./Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат. Т. 1. 1988. 456 с., Т. 2. 1989. - 688 с.
- 10 **СТП 101-00.** Общие требования и правила оформления выпускных квалификационных работ, курсовых проектов (работ), отчётов по РГР, по УИРС, по производственной практике и рефератов. – Оренбург. ОГУ, 2000. – 62с.

Приложение А

(справочное)

Технические данные двигателей постоянного тока

Таблица А.1 – Технические данные двигателей постоянного тока серии 2П с
высотами оси вращения 90 – 315 мм
(исполнение по степени защиты IP22, способ охлаждения IC01)

Мощность, кВт	Напря- жение, В	Частота враще- ния, <i>об/мин</i>		К.П.Д., %	Сопротивление обмотки при 15° C, Ом		
		Номи- нальная	Макси- мальная		якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения
Тип 2ПН90МУХЛ4							
0,17	110	750	3000	47,5	5,84	4,4	162
0,17	220	750	1500	48,5	27,2	16,2	610
0,25	110	1060	4000	56	3,99	2,55	162
0,25	220	1120	2000	57	15,47	11,2	610
0,37	110	1500	3000	61,5	2,52	1,47	162
0,37	220	1500	2250	61,5	10,61	6,66	610
0,71	110	2360	4000	69,5	1	0,54	123
0,71	220	2360	3540	70	3,99	2,55	470
1	110	3000	4000	71,5	0,6	0,35	92
1	220	3000	4000	72,5	2,52	1,47	365
Тип 2ПН90ЛУХЛ4							
0,2	110	750	3000	54	4,51	2,99	145
0,2	220	800	1500	54,5	17,5	13,13	555
0,34	110	1060	4000	60	2,85	1,731	145
0,34	220	1000	2000	60	12,2	7,96	555
0,55	110	1500	4000	67,5	1,3	0,932	112
0,55	220	1500	4300	67,5	5,44	3,89	432
0,9	110	2000	4000	73	0,644	0,4	87
0,9	220	2120	4000	73	2,85	1,731	340
1,3	110	3150	4000	76	0,355	0,257	87
1,3	220	3150	4000	78	1,3	0,932	340

Продолжение таблицы А.1

Мощность, кВт	Напря- жение, В	Частота враще- ния, <i>об/мин</i>		К.П.Д., %	Сопротивление обмотки при 15°С, Ом		
		Номи- нальная	Макси- мальная		якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения
2ПН100МУХЛ4							
0,37	110	750	3000	60	2,69	1,62	120
0,37	220	750	1500	59,5	11,78	6,7	470
0,5	110	1000	4000	65	1,79	0,93	120
0,5	220	1000	2000	66	7,05	4,62	470
0,75	110	1500	4000	71	0,805	0,57	103
0,75	220	1500	4300	71,5	3,4	2,05	359
1,2	110	2120	4000	75	0,436	0,355	103
1,2	220	2200	4000	76,5	1,792	0,93	359
2	110	3000	4000	78,5	0,201	0,135	73
2	220	3000	4000	79	0,805	0,57	265
Тип 2ПН100ЛУХЛ4							
0,42	110	750	3000	60,5	2,05	1,28	114
0,42	220	750	1500	61,5	7,87	6,2	397
0,63	110	1000	4000	67	1,17	0,853	114
1,1	220	1060	2000	67	4,92	3,52	397
1,1	110	1500	4000	72,5	0,52	0,51	81
1,1	220	1500	4300	74	2,2	1,57	295
1,7	110	2200	4000	77	0,294	0,235	81
1,7	220	2200	4000	78	1,17	0,853	295
2,2	110	3000	4000	79,5	0,16	0,146	81
2,2	220	3150	4000	81	0,52	0,51	295
2ПН112МУХЛ4							
0,6	110	800	3000	59	1,29	1,12	61,4
0,6	220	800	2500	60,5	5,07	4,5	233
0,85	110	1060	4000	63	0,788	0,682	61,4
0,85	220	950	3500	64	3,85	3,08	233
1,5	110	1500	4000	70	0,42	0,355	44

Продолжение таблицы А.1

Мощность, кВт	Напря- жение, В	Частота враще- ния, <i>об/мин</i>		К.П.Д., %	Сопротивление обмотки при 15°С, Ом		
		Номи- нальная	Макси- мальная		якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения
2ПН112МУХЛ4							
1,5	220	1500	4000	70	1,77	1,55	181
2,5	110	2120	4000	76	0,169	1,134	39,4
2,5	220	2200	4000	76	0,788	0,682	156
3,6	110	3150	4000	78,5	0,084	0,089	33,6
3,6	220	3000	4000	79	0,42	0,356	129
2ПН112ЛУХЛ4							
0,8	110	750	3000	62,5	0,968	0,848	57,5
0,8	220	750	2500	63,5	3,68	3,42	235
1,25	110	1060	4000	68,5	0,517	0,444	52
1,25	220	1000	3500	68	2,34	2,04	202
2,2	110	1500	4000	74,5	0,242	0,195	44
2,2	220	1500	4000	75	0,968	0,848	168
3,4	110	2240	4000	76	0,103	0,11	33,5
3,4	220	2200	4000	78	0,413	0,411	125
5,3	110	3350	4000	79,5	0,46	0,051	25,3
5,3	220	3000	4000	80	0,242	0,195	96,3
2ПН132МУХЛ4							
1,6	110	750	3000	68	0,472	0,308	35
1,6	220	750	2500	68,5	1,88	1,39	134
2,5	110	1000	4000	72	0,271	0,204	35
2,5	220	1000	3000	73,5	1,08	0,763	134
2,5	440	1000	2500	73	4,54	3,26	
4	110	1500	4000	77,5	0,14	0,094	35
4	220	1500	4000	79	0,564	0,336	134
4	440	1500	3750	79	2,28	1,44	

Продолжение таблицы А.1

Мощность, кВт	Напря- жение, В	Частота враще- ния, <i>об/мин</i>		К.П.Д., %	Сопротивление обмотки при 15°С, Ом		
		Номи- нальная	Макси- мальная		якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения
2ПН132МУХЛ4							
7	110	2200	4000	81	0,067	0,049	25,6
7	220	2240	4000	83	0,226	0,166	111
7	440	2240	4000	83	0,906	0,692	
10,5	220	3000	4000	84	0,14	0,094	111
10,5	440	3000	4000	85	0,564	0,336	
2ПН132ЛУХЛ4							
1,9	110	750	3000	71	0,322	0,27	37,5
1,9	220	750	2500	72	1,28	1	138
1,9	440	750	1850	70,5	6,42	4,45	
3	110	950	4000	74,5	0,22	0,196	37,5
3	220	1000	4000	75,5	0,88	0,64	138
3	440	1000	3750	76,5	3,38	2,16	
5,5	110	1500	4000	80	0,08	0,066	27,8
5,5	220	1500	4000	80,5	0,322	0,27	101
5,5	440	1600	3750	81	1,28	1	
8,5	220	2200	4000	84	0,167	0,124	89
8,5	440	2240	4000	84,5	0,67	0,445	
14	220	3150	4000	86	0,08	0,66	76
14	440	3150	4000	86,5	0,322	0,27	
2ПН160МУХЛ4							
3	110	750	3000	75,5	0,138	0,135	34,3
3	220	750	2500	76,5	0,732	0,465	128
3	440	750	1850	76	3,15	2,21	
4,5	110	950	4000	78,5	0,11	0,078	26,8
4,5	220	1000	3000	79,5	0,411	0,304	108
4,5	440	950	2500	79	1,78	1,44	
7,5	110	1600	4000	83	0,037	0,024	21,9
7,5	220	1500	4000	83	0,183	0,135	82
7,5	440	1500	3750	84	0,732	0,485	

Продолжение таблицы А.1

Мощность, кВт	Напря- жение, В	Частота враще- ния, <i>об/мин</i>		К.П.Д., %	Сопротивление обмотки при 15° С, Ом		
		Номи- нальная	Макси- мальная		якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения
2ПН160МУХЛ4							
13	220	2120	4000	85,5	0,081	0,056	61,5
13	440	2360	4000	86,5	0,279	0,175	
18	220	3150	4000	87	0,037	0,024	53,1
18	440	3150	4000	87,5	0,145	0,101	
2ПН160ЛУХЛ4							
4	110	750	3000	77,5	0,13	0,102	32,8
4	220	800	2500	78,5	0,486	0,389	117
4	440	750	1850	78,5	2,02	1,8	
6,3	110	1000	4000	80,5	0,069	0,049	23,6
6,3	220	1000	3000	81,5	0,278	0,196	87,6
6,3	440	1060	2500	82	0,485	0,842	
11	220	1500	4000	85,5	0,096	0,073	65,3
11	440	1600	3750	85,5	0,385	0,364	
16	220	2360	4000	86,5	0,044	0,031	49,4
16	440	2360	4000	87,5	0,171	0,131	
24	220	3150	4000	88	0,024	0,017	49,4
24	440	3150	4000	89	0,096	0,073	
2ПН180МУХЛ4							
5,6	110	750	3000	78,5	0,084	0,056	17,5
5,6	220	750	2500	79	0,338	0,221	74,8
5,6	440	750	1850	79,5	1,5	0,825	
8	110	1000	3500	81,5	0,058	0,037	17,5
8	220	1060	3000	83	0,181	0,122	74,8
8	440	1000	2500	82	0,902	0,54	
15	110	1500	3500	85,5	-	-	15
15	220	1500	4000	85,5	0,084	0,056	55,5
15	440	1500	3500	86	0,338	0,221	

Продолжение таблицы А.1

Мощность, кВт	Напря- жение, В	Частота враще- ния, <i>об/мин</i>		К.П.Д., %	Сопротивление обмотки при 15° С , Ом		
		Номи- нальная	Макси- мальная		якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения
2ПН180МУХЛ4							
26	220	2240	3500	88	0,038	0,025	49,2
26	440	2240	3500	89	0,15	0,092	
37	220	3000	3500	89,5	0,022	0,015	55,5
37	440	3150	3500	79,5	0,084	0,056	
2ПН180ЛУХЛ4							
7,1	110	750	3000	80	0,065	0,044	17,3 64
7,1	220	750	2500	80,5	0,26	0,183	
7,1	440	750	1800	82,5	1,06	0,67	
10	110	1000	3500	82,5	0,042	0,03	17 64
10	220	1000	3000	82,5	0,168	0,11	
10	440	1000	2500	83,5	0,585	0,482	
18,5	220	1500	3500	87	0,065	0,044	64
18,5	440	1600	3500	87,5	0,26	0,183	
30	440	2200	3500	89	0,136	0,084	
42	440	3000	3500	90,5	0,065	0,044	
2ПН200МУХЛ4							
8,5	110	800	3000	81	0,047	0,029	17,1 61,6
8,5	220	800	2500	82	0,188	0,116	
8,5	440	800	1850	82	0,796	0,506	
13	110	1120	3500	84	0,026	0,016	17,1 61,6
13	220	1120	3000	85	0,106	0,061	
13	440	1000	2500	84,5	0,485	0,303	
22	220	1500	3500	87,5	0,047	0,029	53
22	440	1500	3500	87,5	0,246	0,13	
36	220	2200	3500	88,5	0,026	0,016	46
36	440	2200	3500	89,5	0,106	0,061	
60	440	3150	3500	90,5	0,047	0,029	

Продолжение таблицы А.1

Мощность, кВт	Напря- жение, В	Частота враще- ния, об/мин		К.П.Д., %	Сопротивление обмотки при 15° С, Ом		
		Номи- нальная	Макси- мальная		якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения
2ПН200ЛУХЛ4							
11	110	800	3000	83	0,031	0,02	15,9
11	220	800	2500	84	0,125	0,08	55
11	440	750	1850	83,5	0,565	0,393	
16	220	1000	3000	86	0,083	0,053	55
16	440	1000	2500	86	0,343	0,224	
30	220	1500	3500	88,9	0,031	0,02	42
30	440	1600	3500	89,5	0,185	0,08	
53	440	2360	3500	90,5	0,055	0,037	
75	440	3150	3500	91,5	0,031	0,02	
2ПН225МУХЛ4							
7,5	220	1500	1800	77	0,35	0,101	82,43
11	220	600	2100	79,5	0,202	0,0678	62,25
15	220	750	2500	80,5	0,146	0,0637	62,25
22	220	1000	2500	82	0,086	0,0429	62,6
37	220	1500	3000	86,5	0,0366	0,0159	45,75
37	440	1500	1850	86,5	0,168	0,0678	43
2ПН225ЛУХЛ4							
15	220	600	2100	79	0,160	0,0742	52,32
18,5	220	750	2500	83	0,095	0,05	52,32
18,5	440	750	1500	83	0,473	0,208	49,7
30	220	1060	2500	84,5	0,049	0,0197	38,6
30	440	1060	2250	84,5	0,196	0,07	38,6
45	220	1500	3000	87,5	0,237	0,0125	38,6
2ПН250МУХЛ4							
15	220	530	1500	80	0,142	0,078	37,9
18	220	630	2100	80,5	0,110	0,054	37,9
18	440	600	1800	80,5	0,570	0,250	37,9
22	220	750	2000	81	0,074	0,039	37,9
22	440	850	2400	81	0,235	0,096	28,7
37	220	1060	2500	85	0,035	0,019	28,7
37	440	1060	2500	85	0,152	0,078	28,7

Продолжение таблицы А.1

Мощность, кВт	Напря- жение, В	Частота враще- ния, <i>об/мин</i>		К.П.Д., %	Сопротивление обмотки при 15° С, Ом		
		Номи- нальная	Макси- мальная		якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения
2ПН250МУХЛ4							
50	440	1500	1800	87	0,11	0,054	29,8
55	220	1500	2800	87	0,0185	0,098	26,8
55	440	1700	2800	87	0,059	0,026	20,2
2ПН250ЛУХЛ4							
22	220	600	2100	82	0,082	0,047	33,4
22	440	600	1800	82	0,38	0,19	33,4
28	440	750	1900	83	0,26	0,11	33,4
30	220	750	2000	84	0,051	0,031	33,4
45	220	1000	2500	85,5	0,03	0,016	25,09
45	440	1000	1500	85,5	0,122	0,064	33,4
71	440	1500	2800	88,5	0,0653	0,031	31,2
75	220	1500	2800	89	0,013	0,0077	23,5
2ПН280МУХЛ4							
22	220	530	1250	83	0,062	0,033	39,6
30	220	600	1500	84,5	0,046	0,022	23
30	440	600	1500	84,5	0,185	0,0817	30
45	220	750	2000	86	0,034	0,015	28
45	440	750	1200	86,5	0,137	0,0618	30
75	220	1000	2250	88,5	0,016	0,083	22,8
75	440	1180	2400	88,5	0,046	0,022	25
90	440	1500	1500	89			
110	220	1500	2600	89,5	0,0075	0,0038	22,8
110	440	1500	2250	89,5	0,034	0,0154	30
2ПН280ЛУХЛ4							
30	220	500	1250	83,5	0,05	0,025	26,7
30	440	500	1250	83,5	0,2	0,092	26,7
37	220	600	1500	86	0,037	0,017	25,2
37	440	600	1500	86	0,147	0,069	26,6
55	220	750	2000	87,5	0,025	0,012	25,2
85	440	1000	2250	88,4	0,05	0,025	19,7
90	220	1060	2000	88,4	0,012	0,0053	19,7
132	220	1500	2600	90,6	0,0060	0,034	25,2
132	440	1500	1900	90,6	0,0248	0,012	25,2

Продолжение таблицы А.1

Мощность, кВт	Напря- жение, В	Частота враще- ния, <i>об/мин</i>		К.П.Д., %	Сопротивление обмотки при 15° С, Ом		
		Номи- нальная	Макси- мальная		якоря	добавочных полюсов	возбуж- дения
2ПН315МУХЛ4							
45	220	600	1500	85,5	0,03	0,014	34,08
45	440	600	1500	85,5	0,12	0,058	25,6
55	440	750	1800	87	0,068	0,028	18,8
100	440	1000	2250	88	0,04	0,024	25,6
110	220	1000	2250	89	0,0082	0,0045	18,8
160	220	1500	2400	90	0,004	0,0024	25,6
160	440	1500	2400	90	0,0116	0,0071	25,6
2ПН315ЛУХЛ4							
45	220	500	1250	86,9	0,032	0,016	28,6
45	440	500	1250	86,9	0,128	0,065	21
55	220	600	1500	88	0,022	0,012	27,9
55	440	630	1500	88	0,074	0,032	14,8
75	220	750	1800	88	0,013	0,0081	21,1
75	440	800	1800	88	0,044	0,027	15,5
110	440	1000	2000	89	0,032	0,016	21
132	220	1060	2200	90	0,0064	0,0043	21,1
200	220	1500	2400	91	0,003	0,0017	21
200	440	1500	2400	91	0,013	0,0081	14,8

Приложение Б

(справочное)

Обмоточный провод круглого поперечного сечения

Таблица Б.1 – Диаметры и площади поперечного сечения круглых медных
эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номиналь- ный диа- метр не- изолиро- ванного провода, мм	Среднее значение диаметра изолиро- ванного провода, мм	Площадь поперечно- го сечения неизолиро- ванного провода, мм ²	Номиналь- ный диа- метр не- изолиро- ванного провода, мм	Среднее значение диаметра изолиро- ванного провода, мм	Площадь поперечно- го сечения неизолиро- ванного провода, мм ²
0.08	0.1	0.00502	(0.53)	0.585	0.221
0.09	0.11	0.00636	0.56	0.615	0.246
0.1	0.122	0.00785	0.6	0.655	0.283
0.112	0.134	0.00985	0.63	0.69	0.312
0.125	0.147	0.01227	(0.67)	0.73	0.358
(0.132)	0.154	0.01368	0.71	0.77	0.396
0.14	0.162	0.01539	0.75	0.815	0.442
0.15	0.18	0.01767	0.8	0.865	0.503
0.16	0.19	0.0201	0.85	0.915	0.567
0.17	0.2	0.0227	0.9	0.965	0.636
0.18	0.21	0.0255	0.95	1.015	0.706
(0.19)	0.22	0.0284	1.0	1.08	0.785
0.2	0.23	0.0314	1.06	1.14	0.883
(0.212)	0.242	0.0353	1.12	1.20	0.985
0.224	0.259	0.0394	1.18	1.26	1.094
(0.236)	0.271	0.0437	1.25	1.33	1.227
0.25	0.285	0.0491	1.32	1.405	1.368
(0.265)	0.3	0.0552	1.40	1.485	1.539
0.28	0.315	0.0616	1.50	1.585	1.767
(0.3)	0.335	0.0707	1.60	1.685	2.011
0.315	0.35	0.0779	1.70	1.785	2.27
0.335	0.37	0.0881	1.80	1.895	2.54
0.355	0.395	0.099	1.90	1.995	2.83
0.375	0.415	0.1104	2.00	2.095	3.14
0.4	0.44	0.1257	2.12	2.220	3.53
0.425	0.565	0.1419	2.24	2.34	3.94
0.45	0.49	0.159	2.36	2.46	4.36
(0.475)	0.515	0.1772	2.5	2.6	4.91
0.5	0.545	0.1963			

П р и м е ч а н и е - Провода, размеры которых указаны в круглых скобках, сле-
дует применять только при обосновании технико-экономической целесообраз-
ности.

Таблица Б.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
ПБД	-	-	0.19	0.22	0.22	0.22	0.22
АПБД	-	-	-	-	-	-	-
ПЭЛБО	-	-	0.125	0.155	0.16	0.165	0.17
ПЭЛШО, ПЕЛШКО	0.07	0.075	0.09	0.1	0.105	0.11	0.115
ПСД, ПСДК	-	-	-	-	0.23	0.23	0.25
ПСДТ	-	-	-	-	0.18	0.18	0.19
ПСДКТ	-	-	-	-	0.14	0.14	0.16
ПДА	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы Б.2

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции при диаметрах голого провода d, мм					
	0.75-0.95	1-1.4	1.5-1.6	1.7-2.12	2.24-5	5-5.2
ПБД	0.22	0.27	0.27	0.27	0.33	0.33
АПБД	-	0.27	0.27	0.27	0.33	0.33
ПЭЛБО	0.18	0.21	0.21	0.21	-	-
ПЭЛШО, ПЕЛШКО	0.125	0.135	0.155	0.155	-	-
ПСД, ПСДК	0.25	0.27	0.27	0.27	0.33	0.33
ПСДТ	0.2	0.21	0.21	0.23	-	-
ПСДКТ	0.16	0.18	0.18	-	-	-
ПДА	-	0.3	0.3	0.3	0.35	0.35

Приложение В (справочное) **Обмоточный провод прямоугольного поперечного сечения**

Таблица В.1 – Размеры и площади 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
	Расчетное сечение проволоки, мм ²							
2	1.463	1.545	1.626	1.706	1.785	1.905	2.025	2.145
2.12	1.559	-	1.734	-	1.905	-	2.16	-
2.24	1.655	1.749	1.842	1.934	2.025	2.16	2.294	2.429
2.36	1.751	-	1.95	-	2.145	-	2.429	-
2.5	1.863	1.97	2.076	2.181	2.285	2.435	2.585	2.736
2.65	1.983	-	2.211	-	2.435	-	2.753	-
2.8	2.103	2.225	2.346	2.466	2.585	2.753	2.921	3.089
3	2.263	-	2.526	-	2.785	-	3.145	-
3.15	2.383	2.522	2.661	2.799	2.935	3.124	3.313	3.502
3.35	2.543	-	2.841	-	3.135	-	3.537	-
3.55	2.703	2.862	3.021	3.179	3.335	3.548	3.761	3.974
3.75	2.863	-	3.201	-	3.535	-	3.985	-
4	3.063	3.245	3.426	3.606	3.785	4.025	4.265	4.505
4.25	3.263	-	3.651	-	4.035	-	4.545	-
4.5	3.463	3.67	3.876	4.081	4.285	4.555	4.825	5.095
4.75	3.663	-	4.101	-	4.535	-	5.105	-
5	3.863	4.095	4.326	4.556	4.785	5.085	5.385	5.685
5.3	4.103	-	4.596	-	5.085	-	5.721	-
5.6	4.343	4.605	4.866	5.126	5.385	5.721	6.057	6.393
6	4.663	-	5.226	-	5.785	-	6.505	-
6.3	4.903	5.2	5.496	5.791	6.085	6.463	6.841	7.219
6.7	-	-	5.856	-	6.485	-	7.289	-
7.1	-	-	6.216	6.551	6.885	7.311	7.737	8.163
7.5	-	-	-	-	7.285	-	8.185	-
8	-	-	-	-	7.785	8.265	8.745	9.225
8.5	-	-	-	-	-	-	9.305	-
9	-	-	-	-	-	-	9.865	10.41
9.5	-	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы В.1

Номинальный размер прово- локи по большой сто- роне b , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a , мм							
	1.25	1.32	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
	Расчетное сечение проволоки, мм ²							
2	2.285	2.425	2.585	-	-	-	-	-
2.12	2.435	-	2.753	-	-	-	-	-
2.24	2.585	2.742	2.921	3.145	3.369	-	-	-
2.36	2.735	-	3.089	-	3.561	-	-	-
2.5	2.91	3.085	3.285	3.535	3.785	3.887	4.137	-
2.65	3.098	-	3.495	-	4.027	-	4.407	-
2.8	3.285	3.481	3.705	3.985	4.265	4.397	4.677	4.957
3	3.535	-	3.985	-	4.585	-	5.038	-
3.15	3.723	3.943	4.195	4.51	4.825	4.992	5.307	5.622
3.35	3.973	-	4.475	-	5.145	-	5.667	-
3.55	4.224	4.471	4.755	5.11	5.465	5.672	6.027	6.382
3.75	4.473	-	5.035	-	5.785	-	6.387	-
4	4.785	5.065	5.385	5.785	6.185	6.437	6.837	7.237
4.25	5.098	-	5.735	-	6.585	-	7.287	-
4.5	5.41	5.725	6.085	6.535	6.985	7.287	7.737	8.187
4.75	5.723	-	6.435	-	7.385	-	8.188	-
5	6.035	6.385	6.785	7.285	7.785	8.137	8.637	9.137
5.3	6.41	-	7.205	-	8.265	-	9.177	-
5.6	6.785	8.101	7.625	8.185	8.745	9.157	9.717	10.28
6	7.285	-	8.185	-	9.385	-	10.44	-
6.3	7.66	9.101	8.605	9.235	9.865	10.35	10.98	11.61
6.7	8.16	-	9.165	-	10.51	-	11.7	-
7.1	8.66	9.157	9.725	10.44	11.15	11.71	12.42	13.13
7.5	9.16	-	10.29	-	11.79	-	13.14	-
8	9.785	10.35	10.99	11.79	12.59	13.24	14.04	14.84
8.5	10.41	-	11.69	-	13.39	-	14.94	-
9	11.04	11.67	12.39	13.29	14.19	14.94	15.84	16.74
9.5	11.66	-	13.09	-	14.99	-	16.74	-
10	12.29	12.99	13.79	14.79	15.79	16.64	17.64	18.64
10.6	-	-	14.63	-	16.75	-	18.72	-
11.2	-	-	15.47	16.59	17.71	18.68	19.8	20.92
11.8	-	-	-	-	18.67	-	20.88	-
12.5	-	-	-	-	19.79	20.89	22.14	23.39

Продолжение таблицы В.1

Номинальный размер прово- локи по большой сто- роне b , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a , мм							
	2	2.12	2.24	2.36	2.5	2.65	2.8	3
	Расчетное сечение проволоки, мм ²							
2	-	-	-	-	-	-	-	-
2.12	-	-	-	-	-	-	-	-
2.24	-	-	-	-	-	-	-	-
2.36	-	-	-	-	-	-	-	-
2.5	-	-	-	-	-	-	-	-
2.65	-	-	-	-	-	-	-	-
2.8	5.237	-	-	-	-	-	-	-
3	5.638	-	-	-	-	-	-	-
3.15	5.937	6.315	6.693	-	-	-	-	-
3.35	6.337	-	7.141	-	-	-	-	-
3.55	6.737	7.163	7.589	7.829	8.326	-	-	-
3.75	7.137	-	8.037	-	8.826	-	-	-
4	7.637	8.117	8.597	8.891	9.451	10.65	10.85	-
4.25	8.137	-	9.157	-	10.08	-	11.35	-
4.5	8.637	9.177	9.717	10.07	10.7	11.38	12.05	12.95
4.75	9.137	-	10.28	-	11.33	-	12.75	-
5	9.637	10.24	10.84	11.25	11.95	12.7	13.45	14.45
5.3	10.24	-	11.51	-	12.7	-	14.29	-
5.6	10.84	11.51	12.18	12.67	13.45	14.29	15.13	16.25
6	11.64	-	13.08	-	14.45	-	16.25	-
6.3	12.24	12.99	13.75	14.32	15.2	16.15	17.09	18.35
6.7	13.04	-	14.65	-	16.2	-	18.21	-
7.1	13.84	14.69	15.54	16.21	17.2	18.27	19.33	20.75
7.5	14.64	-	16.44	-	18.2	-	20.45	-
8	15.64	16.6	17.56	18.33	19.45	20.65	21.85	23.45
8.5	16.64	-	18.68	-	20.7	-	23.25	-
9	17.64	18.72	19.8	20.69	21.95	23.3	24.65	26.54
9.5	18.64	-	20.92	-	23.2	-	26.05	-
10	19.64	20.84	22.04	23.05	24.45	25.95	27.45	29.45
10.6	20.84	-	23.38	-	25.95	-	29.13	-
11.2	22.04	23.38	24.73	25.88	27.45	29.13	30.81	33.05
11.8	23.24	-	26.07	-	28.95	-	32.49	0
12.5	24.64	26.14	27.64	24.95	30.7	32.58	34.45	36.95

Продолжение таблицы В.1

Номинальный размер прово- локи по большой сто- роне b , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a , мм							
	3.15	3.35	3.55	3.75	4	4.25	4.5	4.75
	Расчетное сечение проволоки, мм ²							
2	-	-	-	-	-	-	-	-
2.12	-	-	-	-	-	-	-	-
2.24	-	-	-	-	-	-	-	-
2.36	-	-	-	-	-	-	-	-
2.5	-	-	-	-	-	-	-	-
2.65	-	-	-	-	-	-	-	-
2.8	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-
3.15	-	-	-	-	-	-	-	-
3.35	-	-	-	-	-	-	-	-
3.55	-	-	-	-	-	-	-	-
3.75	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-
4.25	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5	13.63	-	-	-	-	-	-	-
4.75	14.41	-	-	-	-	-	-	-
5	15.2	16.2	17.2	-	-	-	-	-
5.3	16.15	-	18.27	-	-	-	-	-
5.6	17.09	18.21	19.33	20.14	21.54	-	-	-
6	18.35	-	20.75	-	23.14	-	-	-
6.3	19.3	20.56	21.82	22.77	24.34	25.92	27.49	-
6.7	20.56	-	23.24	-	25.94	-	29.29	-
7.1	21.82	23.24	24.66	25.77	27.54	29.32	31.09	32.87
7.5	23.08	-	26.08	-	29.14	-	32.89	-
8	24.65	26.25	27.85	29.14	31.14	33.14	35.14	37.14
8.5	26.23	-	29.63	-	33.14	-	37.39	-
9	27.8	29.6	31.4	32.89	35.14	37.39	39.64	41.89
9.5	29.38	-	33.18	-	37.14	-	41.89	-
10	30.95	32.95	34.95	36.64	39.14	41.64	44.14	46.64
10.6	32.84	-	37.08	-	41.54	-	46.84	-
11.2	34.73	36.97	39.21	41.14	43.94	46.74	49.54	52.34
11.8	36.62	-	41.34	-	46.34	-	52.24	-
12.5	38.83	41.33	43.83	46.02	49.14	52.27	55.39	58.52

Продолжение таблицы В.1

Номинальный размер прово- локи по большой сто- роне 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
	Расчетное сечение проволоки, мм ²							
7.1	-	-	-	-	-	-	-	-
7.5	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-
8.5	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-
9.5	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-
10.6	-	-	-	-	-	-	-	-
11.2	-	36.97	-	39.21	41.14	-	43.94	-
11.6	-	-	-	-	-	-	-	-
11.8	-	-	-	41.34	-	-	46.34	-
12.5	-	41.33	-	43.83	46.02	-	49.14	-
13.2	-	-	-	46.31	-	-	51.94	-
13.5	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	46.35	-	49.15	51.95	-	55.14	-
14.5	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	52.7	-	-	59.14	-
15.6	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	53.05	-	56.25	59.14	-	63.14	-
16.8	54.62	-	58.82	-	-	63.36	-	68.02
18	58.56	-	63.06	-	-	67.92	-	72.94
19.5	63.48	-	68.35	-	-	73.62	-	79.09
20	-	-	-	-	-	-	79.52	-
22	71.68	-	77.18	-	-	83.12	-	89.34
25	81.52	-	87.77	-	-	94.52	99.52	101.64
26.3	-	-	92.36	-	-	99.46	-	106.97
28	-	-	-	-	-	105.92	111.94	113.94
30	-	-	-	-	-	113.52	119.52	122.14
32	-	-	-	-	-	-	-	130.34
35	-	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы В.1

Номинальный размер проволоки по большей сто- роне b , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a , мм					
	4.25	4.4	4.5	4.7	4.75	5
	Расчетное сечение проволоки, мм ²					
7.1	-	-	-	-	-	34.64
7.5	-	-	-	-	-	36.64
8	-	-	-	-	-	39.24
8.5	-	-	-	-	-	41.64
9	-	-	-	-	-	44.14
9.5	-	-	-	-	-	46.64
10	-	-	-	-	-	49.14
10.6	-	-	-	-	-	52.14
11.2	46.74	-	49.54	-	52.34	55.14
11.6	-	-	-	-	-	-
11.8	-	-	52.24	-	-	58.14
12.5	52.27	-	55.39	-	58.52	61.64
13.2	-	-	58.54	-	-	65.14
13.5	-	-	-	-	-	-
14	58.64	-	62.14	-	66.64	69.14
14.5	-	-	-	-	-	-
15	-	-	66.64	-	-	74.14
15.6	-	-	-	-	-	-
16	67.14	-	71.14	-	75.14	79.14
16.8	-	73.06	-	78.1	-	-
18	-	78.34	-	83.74	-	-
19.5	-	84.94	-	90.79	-	-
20	-	-	-	-	-	99.14
22	-	95.94	-	102.54	-	-
25	-	109.14	-	116.4	-	124.14
26.3	-	114.86	-	122.75	-	-
28	-	122.34	-	130.74	-	-
30	-	131.14	-	140.14	-	149.14
32	-	139.94	-	149.54	-	-
35	-	153.14	-	163.64	-	-

Продолжение таблицы В.1

Номинальный размер проволоки по большей сто- роне b , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a , мм					
	5.1	5.3	5.5	5.6	6	6.5
	Расчетное сечение проволоки, мм ²					
7.1	-	-	-	-	-	-
7.5	-	-	-	-	-	-
8	-	41.54	-	43.94	-	-
8.5	-	-	-	46.74	-	-
9	-	46.84	-	49.54	-	-
9.5	-	-	-	52.34	-	-
10	-	52.14	-	55.14	-	-
10.6	-	-	-	58.5	-	-
11.2	-	58.50	-	61.84	-	-
11.6	-	-	-	-	-	-
11.8	-	-	-	65.22	-	-
12.5	-	65.39	-	69.14	-	-
13.2	-	-	-	73.06	-	-
13.5	-	-	-	-	-	-
14	-	73.34	-	77.54	-	-
14.5	-	-	-	-	-	93.39
15	-	-	-	83.14	-	-
15.6	-	-	-	-	-	100.54
16	-	83.94	-	88.74	95.14	-
16.8	84.82	-	91.54	-	99.94	108.34
18	90.94	-	98.14	-	107.14	116.14
19.5	98.59	-	106.39	-	116.14	125.89
20	-	-	-	-	119.14	-
22	111.34	-	120.14	-	131.14	142.14
25	126.64	-	136.64	-	149.14	161.64
26.3	133.27	-	143.79	-	158.94	170.09
28	141.94	-	153.14	-	167.14	181.14
30	152.14	-	164.14	-	-	-
32	162.34	-	175.14	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы В.1

Номинальный размер проволоки по большей сто- роне b , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a , мм					
	7	8	9	10	11	12.5
	Расчетное сечение проволоки, мм ²					
10	-	-	-	-	-	-
10.8	-	-	96.34	-	-	-
11.2	-	-	-	-	-	-
11.6	-	-	103.54	-	-	-
11.8	-	-	-	-	-	-
12.5	-	99.14	111.64	124.14	136.66	155.41
13.2	-	-	-	-	-	-
13.5	93.64	107.14	120.64	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-
14.5	100.64	115.14	129.64	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-
15.6	108.34	123.94	139.54	154.14	-	-
16	-	127.14	-	-	-	-
16.8	11.74	133.54	-	-	-	-
18	12.14	143.14	-	-	-	-
19.5	135.64	155.14	-	-	-	-
20	-	159.14	-	-	-	-
22	153.14	-	-	-	-	-
25	174.14	-	-	-	-	-
26.3	183.24	-	-	-	-	-
28	195.14	-	-	-	-	-
30	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-

Таблица В.2 – Максимальная толщина изоляции обмоточных проводов

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции прямоугольного провода при меньшей стороне сечения голого провода, мм		
	0.85 – 1.9	2.12 – 3.75	4 – 5.6
ПБД	0.27	0.33	0.44
АПБД	0.27	0.33	0.44
ПЭЛБО	-	-	-
ПЭЛШО, ПЕЛШКО	-	-	-
ПСД, ПСДК	0.27	0.33	0.4
ПСДТ	-	-	-
ПСДКТ	0.22	-	-
ПДА	0.4	0.4	0.4
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП	0.1 – 0.12	0.15	-
ПШТБО, ПШЛБО	0.45	0.45	0.5

Приложение Г
(справочное)
Основные кривые намагничивания сталей

Таблица Г.1 – Основная кривая намагничивания для холоднокатанной изотропной стали 2013

В, Тл	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H, А/м									
1.0	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
1.5	620	670	780	890	1000	1130	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	11200	11800	12400
1.9	13000	13600	14200	14800	15600	16500	17300	18100	18900	19800
2.0	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2.1	60000	67000	74000	81000	88100	95000				

Кривая намагничивания выражается уравнениями:

при $B \leq 1.0Tл$ $H = 110 \cdot B, \text{ А/м};$

при $B \geq 2.15Tл$ $H = [95 + 800(B - 2.15)] \cdot 10^3, \text{ А/м}.$

Таблица Г.2 – Основная кривая намагничивания для холоднокатанных изотропных сталей 2211, 2212, 2214 и 2312

В, Тл	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H, А/м									
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
1.0	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	11100	11700	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
2.0	38800	41000	43200	45400	47600	49800	52000	54500	57500	60500
2.1	65500	72500	80000							

Кривая намагничивания выражается уравнениями:

при $B \leq 0.7Tл$ $H = 137 \cdot B$, А/м;

при $B \geq 2.12Tл$ $H = [80 + 800(B - 2.12)] \cdot 10^3$, А/м.

Таблица Г.3 – Основная кривая намагничивания для холоднокатанной изотропной стали 2411 и 2412

В, Тл	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H, А/м									
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	184	199	205	211
1.0	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1.1	295	304	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	11500	12000	12500	13100	13700	14300	14900
1.8	15600	16200	16800	17500	18300	19100	20000	20900	21900	22900
1.9	23900	25000	26200	27400	28700	30000	32000	36000	42000	50000
2.0	59000									

Кривая намагничивания выражается уравнениями:

при $B \leq 0.7 \text{ Тл}$ $H = 156 \cdot B, \text{ А/м};$

при $B \geq 2.0 \text{ Тл}$ $H = [59 + 900(B - 2.0)] \cdot 10^3, \text{ А/м}.$

Таблица Г.4 – Основная кривая намагничивания для высоколегированной холоднокатанной анизотропной стали 3411 (при намагничивании вдоль проката)

В, Тл	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H, А/м									
1.0	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215
1.1	220	225	230	235	240	245	250	255	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	11200	13000	15500	19000	22500	26000	30000	35000
2.0	40000	45000	50000	55000	60000					

Кривая намагничивания выражается уравнениями:

при $B \leq 1.0Tл$ $H = 170 \cdot B$, А/м;

при $B \geq 2.04Tл$ $H = [60 + 500(B - 2.04)] \cdot 10^3$, А/м.

Таблица Г.5 – Основная кривая намагничивания для высоколегированной холоднокатанной анизотропной стали 3413 (при намагничивании вдоль проката)

В, Тл	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H, А/м									
0.7	103	105	108	110	112.5	115	117.5	119	122	124
0.8	126	129	132	134	136	139	142	145	147	150
0.9	152	155	158	161	164	167	170	173	176	179
1.0	182	185	188	191.5	195	199	203	207	210	213
1.1	216	219	222	225	228	231	234	237	240	243
1.2	246	249	252	255	258	261	264	267	270	273
1.3	276	279	284	287	291	295	299	304	310	313
1.4	318.5	324	329	336	342	348.5	355	363	371	380
1.5	390	400	412	425	438	451	464	478	492	506
1.6	520	536	550	580	596	610	640	670	700	740
1.7	790	820	880	930	990	1060	1130	1210	1300	1400
1.8	1500	1610	1750	1920	2100	2320	2580	2820	3110	3440
1.9	3800									

при $B \leq 0.7Tл$

$$H = 147 \cdot B, \text{ А/м};$$

при $B \geq 1.9Tл$

$$H = [3.8 + 40(B - 1.9)] \cdot 10^3, \text{ А/м}.$$

Таблица Г.6– Кривая намагничивания для полюсов из листовой конструкционной стали (СТ3) толщиной 1 – 2 мм

В, Тл	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H, А/м									
0.9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1.0	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	1700	17800
1.9	18800	19700	20700	21500	22600	23500	24500	25600	26500	27500

при $B \leq 0.9Tл$

$$H = 533 \cdot B, \text{ А/м};$$

при $B \geq 2.0Tл$

$$H = [29 + 130(B - 2.0)] \cdot 10^3, \text{ А/м}.$$

Таблица Г.7– Литая сталь, толстые листы (СТЗ), поковки

В, Тл	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	Н, А/м									
0.0	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	408	417	426	434	443	452	461	470	479
0.6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0.7	584	593	603	613	623	632	642	652	662	672
0.8	682	693	703	724	734	745	755	766	776	787
0.9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1.0	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	2310	3320	3430	3560	3700	3830	3960
1.6	4100	4250	4400	4550	4700	4870	5000	5150	5300	5500

Таблица Г.8 – Удельные потери мощности в листовой электротехнической стали при $B = 1 \text{ Тл}$, $f = 50 \text{ Гц}$ и толщине листов 0.5 мм

Марка стали	2011	2012	2013	2211	2212	2214	2312	2411	2412
$P_{y\partial 1/50}$	3.5	2.9	2.5	2.6	2.2	2	1.75	1.6	1.15
β	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4	1.3	1.3

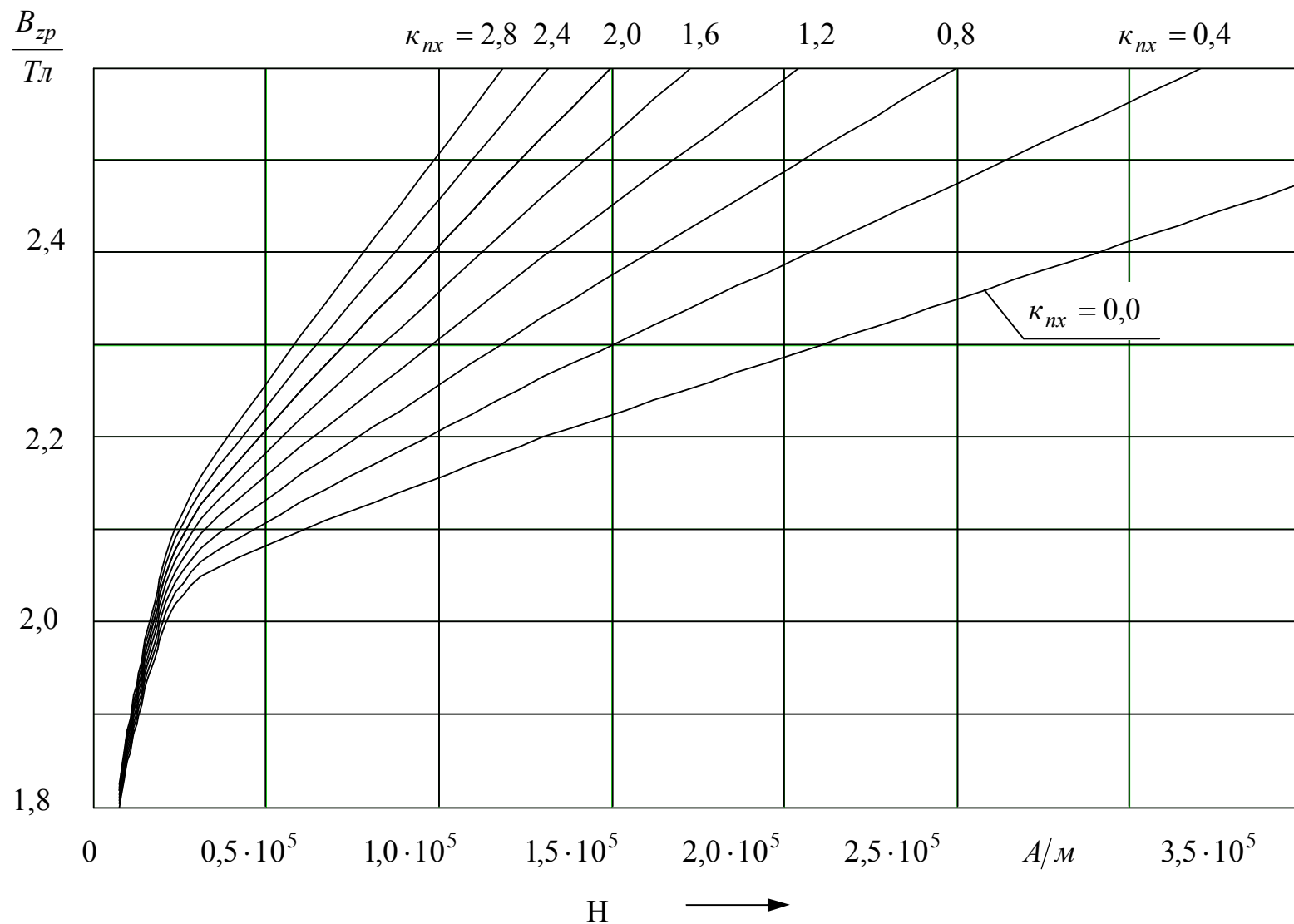


Рисунок Г.1 – Кривые намагничивания для определения магнитного напряжения зоны зубцов (электротехническая сталь 2013) с учётом ответвления магнитного потока в паз

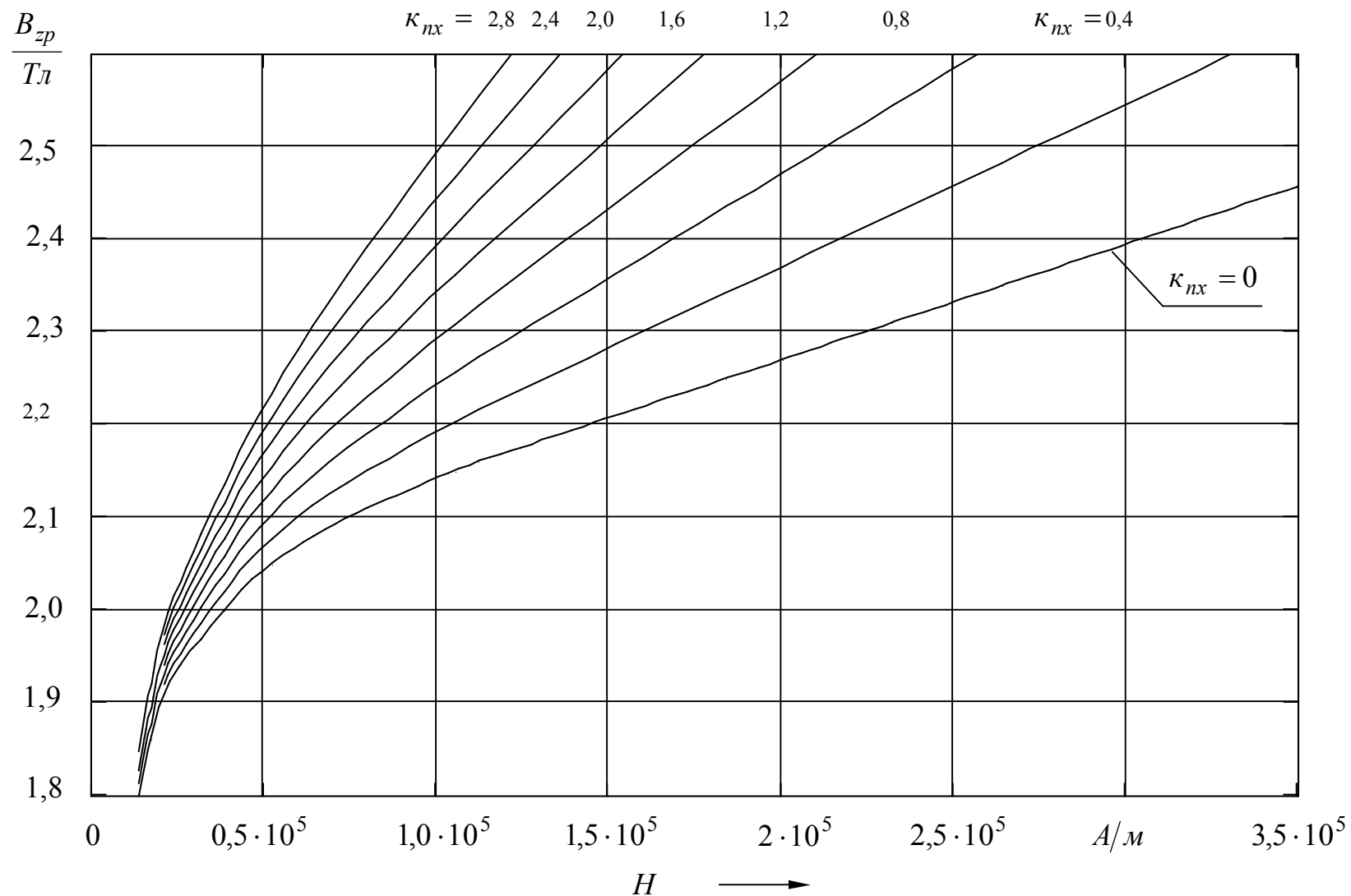


Рисунок Г.2 – Кривые намагничивания для определения магнитного напряжения зоны зубцов (электротехническая сталь 2211, 2212, 2214 и 2312) с учётом отклонения магнитного потока в паз

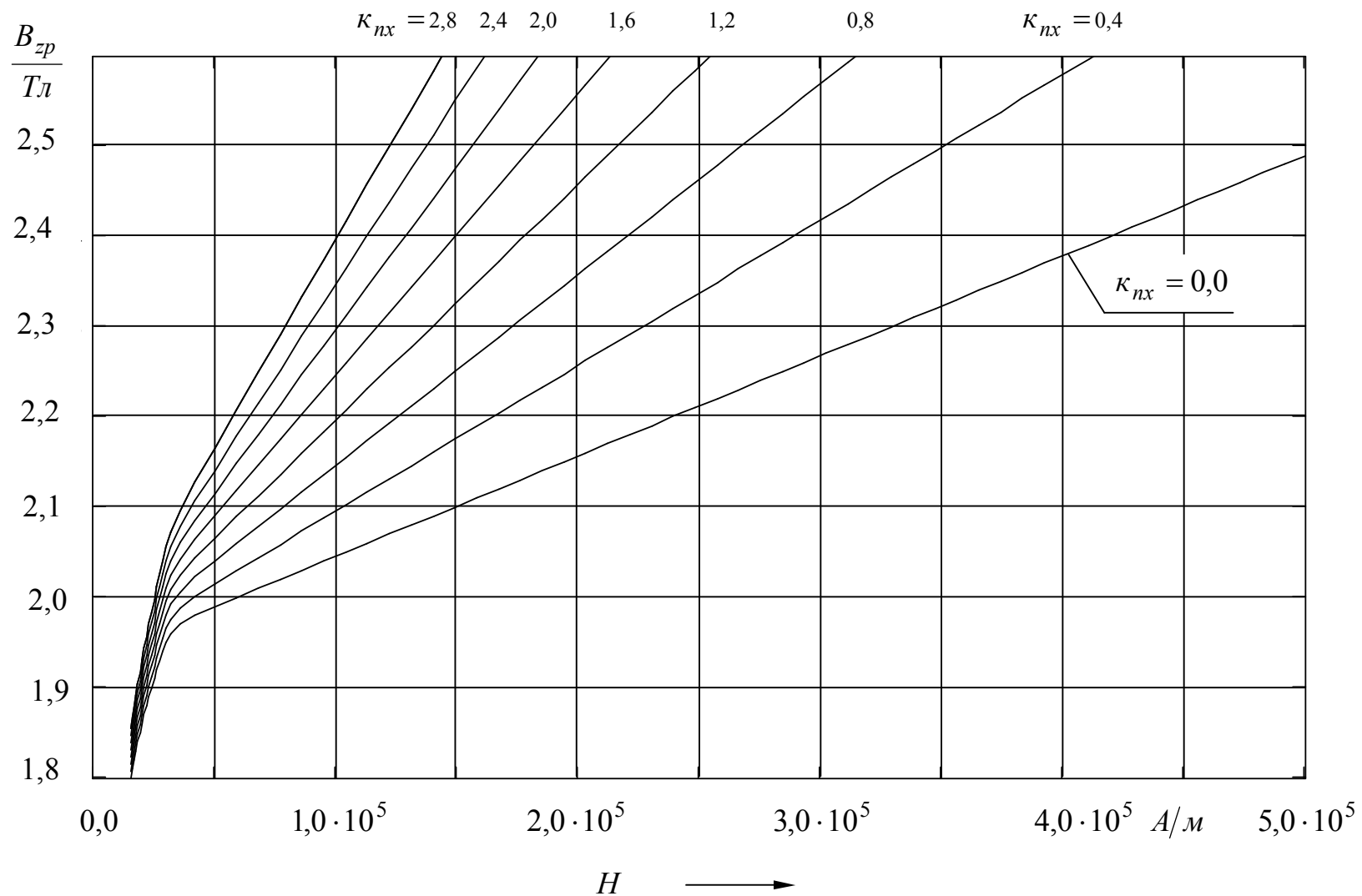


Рисунок Г.3 – Кривые намагничивания для определения магнитного напряжения зоны зубцов (электротехническая сталь 2411 и 2412) с учётом отвлечения магнитного потока в паз

Приложение Д
(справочное)
Подшипники качения

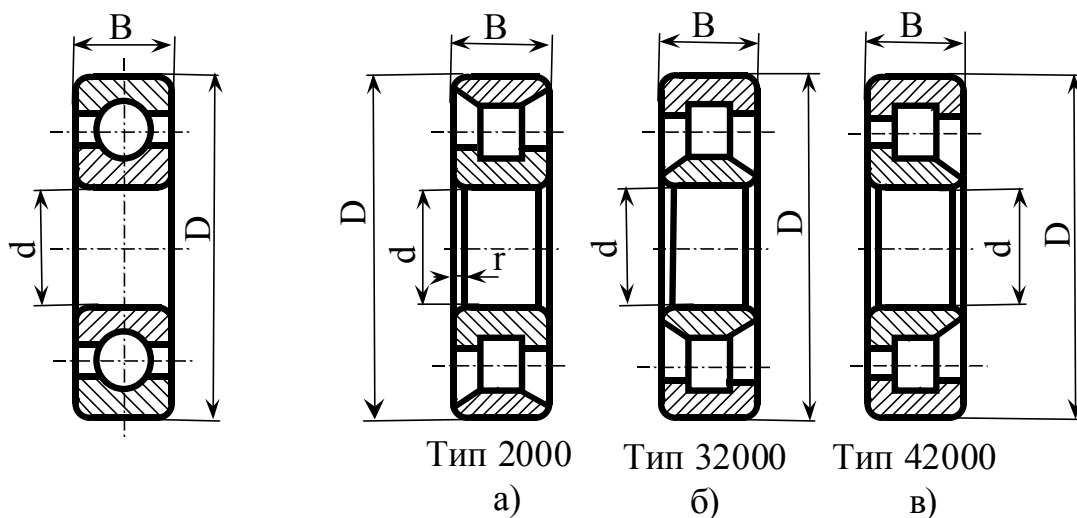


Рисунок Д.1-Шарикоподшипник

Рисунок Д.2-Роликоподшипник

Таблица Д.1 - Шарикоподшипники радиальные однорядные по ГОСТ 8338-75

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C ₀ , Н	n, об/мин
Легкая серия							
200	10	30	9	1	4 600	2 610	20 000
201	12	32	10	1	4 700	2 650	20 000
202	15	35	11	1	5 850	3 470	16 000
203	17	40	12	1	7 400	4 400	16 000
204	20	47	14	1,5	9 800	6 200	12 500
205	25	52	15	1,5	10 800	6 950	10 000
206	30	62	16	1,5	15 000	10 000	10 000
207	35	72	17	2,0	19 700	13 600	8 000
208	40	80	18	2,0	25 100	17 800	6 300
209	45	85	19	2,0	25 200	17 800	6 300
210	50	90	20	2,0	27 000	19 800	6 300
211	55	100	21	2,5	33 400	25 100	5 000
212	60	110	22	2,5	40 400	30 900	5 000
213	65	120	23	2,5	44 000	34 000	5 000
214	70	125	24	2,5	48 000	37 400	4 000
215	75	130	25	2,5	51 000	41 000	4 000
216	80	140	26	3,0	56 000	44 500	4 000
217	85	150	28	3,0	64 000	53 100	4 000
218	90	160	30	3,0	74 000	60 500	3 150
219	95	170	32	3,5	84 000	69 500	3 150
220	100	180	34	3,5	94 000	79 000	3 150

Продолжение таблицы Д.1

Условное обозначение под- шипника	d, мм	D, мм	B, мм	г, мм	C, Н	C ₀ , Н	n, об/мин
Средняя серия							
300	10	35	11	1,0	6 250	3 750	20 000
301	12	37	12	1,5	7 500	4 640	16 000
302	15	42	13	1,5	8 750	5 400	16 000
303	17	47	14	1,5	10 700	6 670	12 500
304	20	52	15	2,0	12 250	7 780	12 500
305	25	62	17	2,0	17 250	11 400	10 000
306	30	72	19	2,0	21 600	14 800	8 000
307	35	80	21	2,5	25 700	17 550	8 000
308	40	90	23	2,5	31 300	22 200	6 300
309	45	100	25	2,5	37 000	26 200	6 300
310	50	110	27	3,0	47 500	35 600	5 000
311	55	120	29	3,0	55 000	41 800	5 000
312	60	130	31	3,5	63 000	48 400	4 000
313	65	140	33	3,5	71 300	55 600	4 000
314	70	150	35	3,5	80 200	63 200	4 000
315	75	160	37	3,5	87 500	71 500	3 150
316	80	170	39	3,5	94 600	80 200	3 150
317	85	180	41	4,0	102 000	89 400	3 150
318	90	190	43	4,0	110 000	99 000	3 150
319	95	200	45	4,0	117 600	109 000	2 500
320	100	215	47	4,0	134 000	130 000	2 500
321	105	225	49	4,0	141 000	142 000	2 500
322	110	240	50	4,0	158 000	167 000	2 500
324	120	260	55	4,0	167 000	180 000	2 000
326	130	280	58	5,0	176 500	194 000	1 600
Тяжелая серия							
403	17	62	17	2,0	17 500	11 900	10 000
405	25	80	21	2,5	28 600	20 400	8 000
406	30	90	23	2,5	36 500	26 800	6 300
407	35	100	25	2,5	43 000	31 300	6 300
408	40	110	27	3,0	49 500	36 400	5 000
409	45	120	29	3,0	59 300	45 500	5 000
410	50	130	31	3,5	67 200	52 000	4 000
411	55	140	33	3,5	77 300	62 500	4 000
412	60	150	35	3,5	84 000	70 000	3 150
413	65	160	37	3,5	91 000	78 000	3 150
414	70	180	42	4,0	111 000	105 000	3 150
415	75	190	45	4,0	117 000	115 000	3 150
416	80	200	48	4,0	126 000	125 000	2 500
417	85	210	52	5,0	134 000	136 000	2 500

Таблица Д.2 - Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами по ГОСТ 8328-75

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C ₀ , Н	n, об/мин
Легкая узкая серия							
2202, 32202, 42202	15	35	11	1,0	5 520	3 020	16 000
2204, 32204, 42204	20	47	14	1,5	11 700	7 250	12 500
2205, 32205, 42205	25	52	15	1,5	13 200	8 450	10 000
2206, 32206, 42206	30	62	16	1,5	17 000	11 200	10 000
2207, 32207, 42207	35	72	17	2,0	25 000	17 200	8 000
2208, 32208, 42208	40	80	18	2,0	33 000	23 500	8 000
2209, 32209, 42209	45	85	19	2,0	34 300	25 200	6 300
2210, 32210, 42210	50	90	20	2,0	38 000	28 600	6 300
2211, 32211, 42211	55	100	21	2,5	43 000	32 300	6 300
2212, 32212, 42212	60	110	22	2,5	53 700	42 000	5 000
2213, 32213, 42213	65	120	23	2,5	61 000	47 600	5 000
2214, 32214, 42214	70	125	24	2,5	67 500	47 700	4 000
2215, 32215, 42215	75	130	25	2,5	76 500	60 000	4 000
2216, 32216, 42216	80	140	26	3,0	78 000	62 300	4 000
2217, 32217, 42217	85	150	28	3,0	97 000	80 900	3 150
2218, 32218, 42218	90	160	30	3,0	119 000	99 000	3 150
- 32219, 42219	95	170	32	3,5	130 000	109 000	3 150
2220, 32220, -	100	180	34	3,5	132 500	109 000	2 500
- 32221, 42221	105	190	36	3,5	160 000	137 000	2 500
2222, 32222, -	110	200	38	3,5	185 000	159 000	2 500
2224, 32224, 42224	120	215	40	3,5	209 000	185 000	2 500
2226, 32226, 42226	130	230	40	4,0	217 000	195 000	2 000
2228, 32228, 42228	140	250	42	4,0	254 000	232 000	2 000
Средняя узкая серия							
2305, 32305, 42305	25	62	17	2,0	22 200	14 500	8 000
2306, 32306, 42306	30	72	19	2,0	29 600	20 200	8 000
2307, 32307, 42307	35	80	21	2,5	33 400	22 800	6 300
2308, 32308, 42308	40	90	23	2,5	40 200	28 000	6 300
2309, 32309, 42309	45	100	25	2,5	55 500	40 000	6 300
2310, 32310, 42310	50	110	27	3,0	64 000	46 500	5 000
2311, 32311, 42311	55	120	29	3,0	82 500	61 500	5 000
2312, 32312, 42312	60	130	31	3,5	98 000	75 800	4 000
2313, 32313, 42313	65	140	33	3,5	103 000	78 800	4 000
2314, 32314, 42314	70	150	35	3,5	121 000	95 500	4 000
2315, 32315, 42315	75	160	37	3,5	139 000	110 000	3 150
2316, 32316, 42316	80	170	39	3,5	147 000	118 500	3 150
2317, 32317, 42317	85	180	41	4,0	175 000	143 000	3 150
2318, 32318, 42318	90	190	43	4,0	190 000	157 000	2 500
2319, 32319, 42319	95	200	45	4,0	206 000	171 500	2 500
2320, 32320, 42320	100	215	47	4,0	238 000	197 000	2 500
2322, 32322, 42322	110	240	50	4,0	301 000	257 000	2 000

Продолжение таблицы Д.2

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	г, мм	C, Н	C ₀ , Н	n, об/мин
2324, 32324, 42324	120	260	55	4,0	380 000	332 000	2 000
2326, 32326, 42326	130	280	58	5,0	424 000	374 000	2 000
2328, 32328, 42328	140	300	62	5,0	469 000	419 000	1 600
2332, 32332, 42332	160	340	68	5,0	541 000	497 000	1 600
2336, 32336, 42336	180	380	75	5,0	764 000	724 000	1 250
2340, 32340, 42340	200	420	80	6,0	860 000	818 000	1 250
Средняя широкая серия							
2605, 32605, 42605	25	62	24	2,0	36 700	27 000	8 000
2606, 32606, 42606	30	72	27	2,0	40 900	30 600	8 000
2607, 32607, 42607	35	80	31	2,5	45 800	34 200	6 300
2608, 32608, 42608	40	90	33	2,5	59 900	46 600	6 300
2609, 32609, 42609	45	100	36	2,5	77 700	61 500	6 300
2610, 32610, 42610	50	110	40	3,0	102 000	85 500	5 000
2611, 32611, 42611	55	120	43	3,0	113 000	92 500	5 000
2612, 32612, 42612	60	130	46	3,5	137 000	116 000	4 000
2613, 32613, 42613	65	140	48	3,5	149 000	126 500	4 000
2615, 32615, 42615	75	160	55	3,5	208 000	183 000	3 150
2616, 32616, 42616	80	170	58	3,5	220 000	198 000	3 150
2617, 32617, 42617	85	180	60	4,0	254 000	230 000	3 150
2618, 32618, 42618	90	190	64	4,0	265 000	240 000	2 500
2620, 32620, 42620	100	215	73	4,0	356 000	336 000	2 500
2622, 32622, 42622	110	240	80	4,0	264 000	450 000	2 000
2624, 32624, 42624	120	260	86	4,0	548 000	532 000	2 000
2626, 32626, 42626	130	280	93	5,0	650 000	650 000	2 000
2630, 32630, 42630	150	320	108	5,0	753 000	757 000	1 600
2634, 32634, 42634	170	360	120	5,0	1 040 000	1 080 000	1 250
Тяжелая серия							
- 32410, 42410	50	130	31	3,5	10 000	75 000	4 000
2411, 32411, 42411	55	140	33	3,5	108 000	82 000	4 000
2412, 32412, 42412	60	150	35	3,5	121 000	101 000	4 000
2413, 32413, 42413	65	160	37	3,5	143 000	112 000	3 150
2414, 32414, -	70	180	42	4	183 000	147 000	3 150
2415, 32415, 42415	75	190	45	4	212 000	173 000	3 150
2416, 32416, -	80	200	48	4	244 000	200 000	2 500
2417, 32417, 42417	85	210	52	5	266 000	221 000	2 500
2418, 32418, 42418	90	225	54	5	300 000	252 000	2 500
- 32419, -	95	240	55	5	320 000	273 000	2 500
2420, 32420, 42420	100	250	58	5	360 000	310 000	2 000
2421, 32421, 42421	105	260	60	5	400 000	345 000	2 000
2422, 32422, 42422	110	280	65	5	445 000	388 000	2 000
2424, 32424, 42424	120	310	72	6	557 000	500 000	2 000
- 32426, 42426	130	340	78	6	670 000	605 000	1 250
- 32428, 42428	140	360	82	6	725 000	655 000	1 250

Таблица Д.3 - Подшипники шариковые радиальные однорядные с двумя уплотнениями (ГОСТ 8882-75)

Условное обозначение под- шип-ника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C ₀ , Н	n, об/мин
Лёгкая широкая серия							
180500	10	30	14	1,0	4 590	2 670	8 000
180501	12	32	14	1,0	4 690	2 670	8 000
180502	15	35	14	1,0	5 220	3 030	6 300
180503	17	40	16	1,0	7 360	4 410	6 300
180504	20	47	18	1,5	8 220	5 000	5 000
180505	25	52	18	1,5	10 800	6 950	4 000
180506	30	62	20	1,5	11 600	7 740	4 000
180508	40	80	23	2,0	23 200	17 750	3 150
180509	45	85	23	2,0	24 100	17 850	3 150
Средняя широкая серия							
180602	15	42	17	1,5	8 750	5 410	8 000
180603	17	47	19	1,5	10 700	6 680	8 000
180604	20	52	21	2,0	12 250	7 800	10 000
180605	25	62	24	2,0	17 250	11 400	7 500
180606	30	77	27	2,0	21 600	14 800	6 000
180607	35	80	31	2,5	25 700	17 550	5 500
180608	40	90	33	2,5	30 600	22 200	4 500
180609	45	100	35	2,5	37 100	26 200	4 500
180610	50	110	40	3,0	47 600	35 600	4 100
180611	55	120	43	3,0	54 900	41 800	4 000
180612	60	130	46	3,5	62 900	48 500	3 400

Приложение Е
(справочное)
Щетки для электрических машин

Таблица Е.1 - Шкала размеров электрощеток (в миллиметрах), $b_{щ} \cdot l_{щ} \cdot h_{щ}$

Тангенци- альный размер $b_{щ}$	Осевой размер щетки $l_{щ}$										
	5.0	6.3	8.0	10	12.5	16	20	25	32	40	50
4	10 12.5	12.5 16	16 20	16 20	20	20					
5		12.5 16	16 20 25	16 20 25	20 25 32	20 25 32	25 32 40				
6.3			20 25	20 25 32	20 25 32	25 32	25 32	32 40	32 40		
8				20 25 32	25 32	25 32	25 32	25 32 40 50	32 40 50		
10					25 32	25 32	25 32 40	32 40 50	32 40 50	40 50	
12.5						25 32	32 40	32 40 50	32 40 50	40 50 64	50 64
16							32 40 50	32 40 50	32 40 50	40 50 64	50 64

Продолжение таблицы Е.1

Тангенци- альный размер $b_{щ}$	Осевой размер щетки $l_{щ}$										
	5.0	6.3	8.0	10	12.5	16	20	25	32	40	50
20								32 40 50	32 40 50	40 50 64	50 64
25									40 50 64	40 50 64	50 64
32										40 50 64	50 64 80
40											80 100

П р и м е ч а н и е - Щётки шириной 25 мм и выше подразделяются на две

Таблица Е.2 – Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего назначения

Обозна- чения марок щеток	Наимено- вание группы марок	Переходное падение на- пряжения на пару ще-ток при реко- мендуемой плотности тока	Плот- ность тока, A/cm^2	Ско- рость, м/сек.	Давле- ние на щётку, кПа	Преимущест- венная об- ласть приме- нения
Г-20 Г-21 Г-22	Угольно- графит- ные	2.9 4.3 2.5	15 5 10	40 30 30	50 15-100 40	Генераторы и двигатели с облегченны- ми условиями коммутации и коллекторные машины пе- ременного тока

Продолжение таблицы Е.2

Обозначения марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока	Плотность тока, А/см ²	Скорость, м/сек.	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
ГЗ 611М 6110М	Графитные	1.9 2 2	11 12 15	25 40 90	20-25 20-25 12-22	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2А ЭГ2АФ ЭГ4 ЭГ8	Электрографитированные	2.6 2.2 2 2.4	10 15 12 10	45 90 40 40	20-25 15-21 15-20 20-40	Генераторы и двигатели со средними и затруднительными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ14 ЭГ51 ЭГ61 ЭГ71 ЭГ74 ЭГ74АФ ЭГ85	Электрографитированные	2.5 2.2 3 2.2 2.7 2.3 2.3	11 12 13 12 15 15 15	40 60 60 40 50 60 50	20-40 20-25 35-50 20-25 17.5-25 15-21 17.5-35	То же
М1 М3 М6 М20	Металлографитные	1.5 1.8 1.5 1.4	15 12 15 12	25 20 25 20	15-20 15-20 15-20 15-20	Низковольтные генераторы и контактные кольца
МГ МГ2 МГ4 МГ64 МГС0 МГС5	Металлографитные	0.2 0.5 1.1 0.5 0.2 2	20 20 15 25 20 15	20 20 20 25 20 35	18-23 18-23 20-25 15-20 18-23 20-25	То же

П р и м е ч а н и е – а) При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и при больших угловых частотах вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щётку может быть повышено до 50 кПа.

б) Плотность тока щётки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

в) Коэффициент трения щёток о коллектор принимается равным 0.25 для всех марок щёток.

Приложение Ж
(справочное)
Упругие втулочно-пальцевые муфты

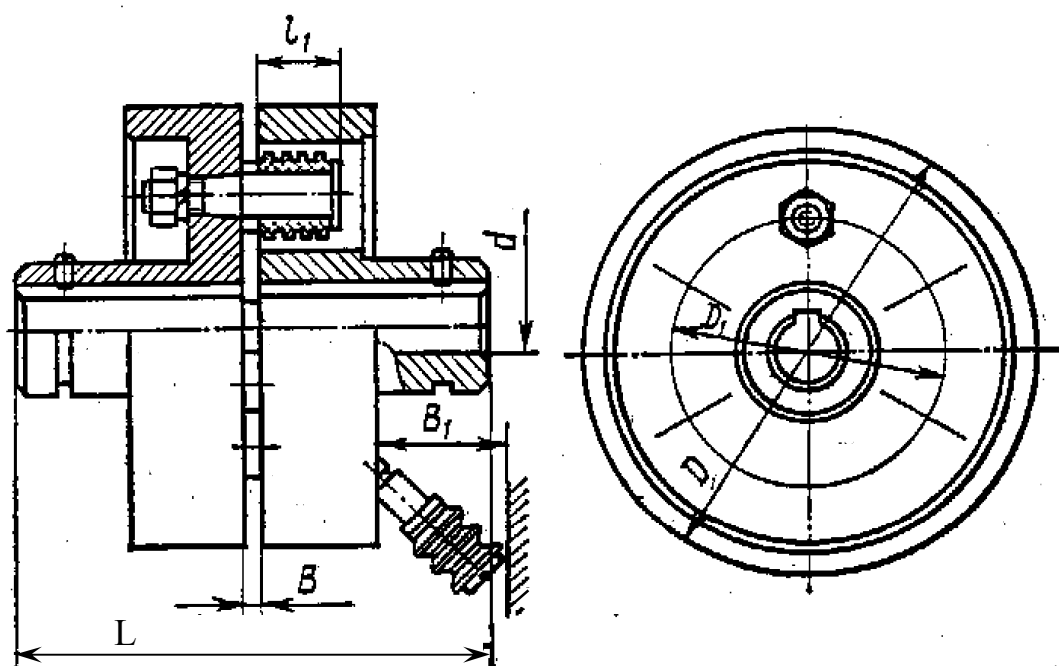


Рисунок Ж.1

Таблица Ж.1 - Размеры, масса, динамический момент инерции и наибольший допустимый крутящий момент упругих втулочно-пальцевых муфт

Условное обозначение	Размеры, мм							Наибольший крутящий момент, Н·м	Наибольшая частота вращения, об/мин	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м ²
	d	D	L	B	B ₁	l ₁	D ₁				
МУВП 1-22	22	100	104	1-4	28	25	68	54	5600	2,140	0,002
МУВП 1-28	28	120	125	1-5	42	32	84	127	4750	4,400	0,006
МУВП 1-32	32	140	165	1-5	42	32	100	235	4000	7,330	0,014
МУВП 1-38	38	140	165	1-5	42	32	100	235	4000	6,970	0,014
МУВП 1-42	42	170	226	2-6	55	42	120	440	3350	13,27	0,039
МУВП 1-45	45	170	226	2-6	55	42	120	440	3350	12,93	0,039
МУВП 1-48	48	190	226	2-6	55	42	140	685	3000	18,04	0,064
МУВП 1-55	55	190	226	2-6	55	42	140	685	3000	17,12	0,064
МУВП 1-60	60	220	286	2-6	55	42	170	1080	2650	27,95	0,130

Продолжение таблицы Ж.1

Условное обозначение	Размеры, мм							Наибольший крутящий момент, Н·м	Наибольшая частота вращения, об/мин	Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м ²
	d	D	L	B	B ₁	l ₁	D ₁				
МУВП 1-65	65	220	286	2-6	55	42	170	1080	2650	27,17	0,130
МУВП 1-70	70	250	288	2-8	70	58	190	1960	2240	38,43	0,240
МУВП 1-75	75	250	288	2-8	70	58	190	1960	2240	37,29	0,0240
МУВП 1-80	80	320	350	2-10	85	75	190	3920	1700	83,21	0,810
МУВП 1-85	85	320	350	2-10	85	75	242	3920	1700	81,64	0,810
МУВП 1-90	90	320	350	2-10	85	75	242	3920	1700	80,01	0,810
МУВП 1-95	95	320	350	2-10	85	75	242	3920	1700	78,26	0,810
МУВП 1-100	100	400	432	2-12	110	90	242	7850	1400	161,8	2,45
МУВП 1-110	110	400	432	2-12	110	90	300	7850	1400	156,9	2,45
МУВП 1-120	120	400	432	2-12	110	90	300	7850	1400	151,6	2,45
МУВП 1-125	125	500	515	2-15	130	110	380	11000	1120	272,9	6,75
МУВП 1-130	130	500	515	2-15	130	110	380	11000	1120	269,3	6,75
МУВП 1-140	140	500	515	2-15	130	110	380	11000	1120	291,0	7,1
МУВП 1-150	150	500	515	2-15	130	110	380	11000	1120	282,9	7,1

Приложение II
(справочное)
Клиноремённые шкивы

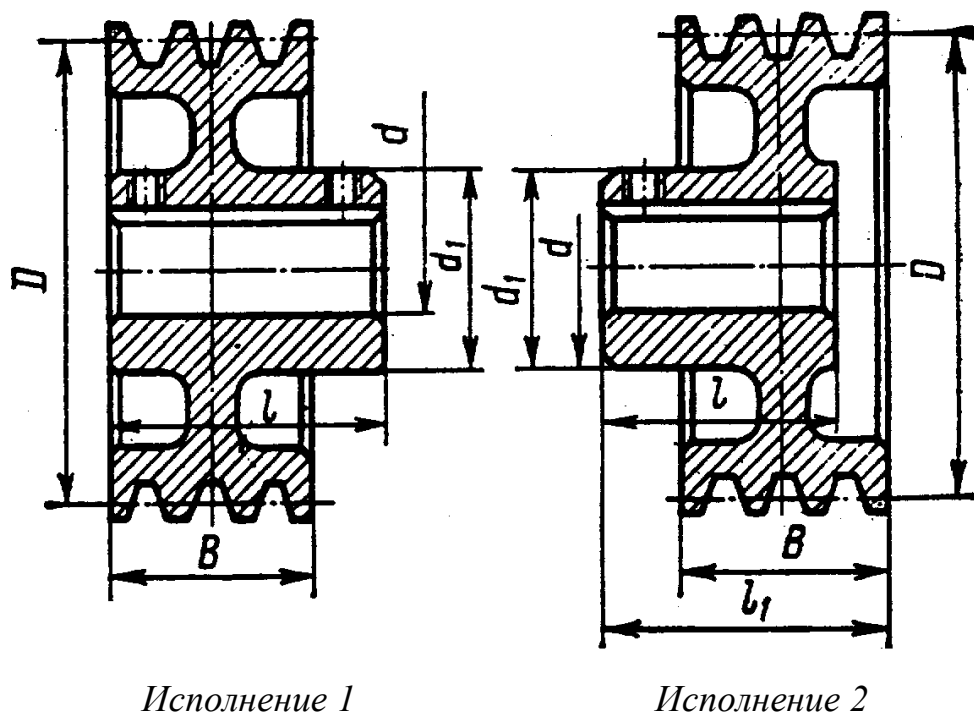


Рисунок И.1

Таблица И.1 – Размеры, масса и динамический момент инерции клиноремённых шкивов

Условное обозначение	Размеры, мм						Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м ²	Исполнение	Номер нормали машиностроения
	d	D	B	l	l ₁	d ₁				
121001	14	112	16	30	-	32	1,06	0,0015	1	МН 4437-63
121008	22	112	40	50	56	40	1,71	0,0030	2	”
121010	28	112	40	60	-	50	1,95	0,0030	1	”
121023	32	125	40	80	-	60	2,81	0,0050	1	”
221029	38	140	38	80	-	80	5,40	0,0110	1	МН 4440-63
221073	42	200	68	110	-	80	7,81	0,0430	1	”
321070	48	224	105	110	-	80	14,0	0,1050	1	МН 4443-63
324075	55	224	105	110	130	100	15,5	0,1090	2	”

Продолжение таблицы И.1

Условное обозначение	Размеры, мм						Масса, кг	Динамический момент инерции, кг·м ²	Исполнение	Номер нормали машиностроения
	d	D	B	l	l ₁	d ₁				
421030	60	250	138	140	-	125	28,0	0,2300	1	МН 4446-63
421031	65	250	138	140	-	125	27,5	0,2300	1	”
421051	70	280	164	140	-	125	34,1	0,3900	1	”
421052	75	280	164	140	-	125	33,50	0,3900	1	”

Приложение К
(обязательное)
Титульный лист пояснительной записки

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Электроэнергетический факультет

Кафедра “Электромеханика”

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

**Двигатель постоянного тока
параллельного возбуждения**

Пояснительная записка

ОГУ 140601.4106.03 ПЗ

Руководитель проекта

_____ Синцов А.М.
" " _____ 2006г.

Исполнитель

студент гр. 02ЭМ

_____ Голубь Н.В.
" " _____ 2006г.

Оренбург 2006

Приложение Л
(обязательное)
Пример оформления листа “Техническое задание”

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Электроэнергетический факультет

Кафедра “Электромеханика”

Техническое задание

Спроектировать двигатель постоянного тока параллельного возбуждения со следующими номинальными данными:

- номинальная мощность $P_{2н} = 7.5 \text{ кВт}$;
- номинальное напряжение $U_n = 220 \text{ В}$;
- номинальная частота вращения $n_n = 1500 \text{ об/мин}$;
- режим работы двигателя $S1$ (продолжительный);
- исполнение по степени защищённости $IP22$;
- исполнение по способу охлаждения $IC01$;
- конструктивное исполнение $IM1001$;
- климатическое исполнение и категория размещения $ХЛЗ$.

Машина должна удовлетворять требованиям *ГОСТ 183–74* и иметь рабочие характеристики, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к машинам серии *2П* .

Разработать чертёж общего вида двигателя постоянного тока.

Дата выдачи задания " ____ " _____ 200__ г.

Руководитель _____ Пашков В.В.

Исполнитель

студент группы 02ЭМ _____ Иванов В.П.

Срок защиты проекта " ____ " _____ 200__ г.

Приложение М

(справочное)

Пример оформления аннотации

Аннотация

В пояснительной записке к курсовому проекту по дисциплине «Инженерное проектирование и САПР электрических машин» представлен электромагнитный, тепловой и вентиляционный расчёт двигателя постоянного тока параллельного возбуждения полезной мощностью 37 кВт на напряжение сети 220 В.

Расчёт двигателя постоянного тока выполнялся вручную и с помощью учебной САПР. В результате проектирования двигателя на ЭВМ в режиме диалога получен вариант проекта, удовлетворяющий требованиям технического задания.

Для спроектированного двигателя постоянного тока параллельного возбуждения выполнен механический расчёт вала и выбраны подшипники. Определены размеры элементов конструкции двигателя.

Пояснительная записка содержит 93 листа рукописного (машинописного) текста, в том числе 23 страницы машинного расчётного формуляра, 12 рисунков, 5 таблиц и список использованных источников из 7 наименований.

					ГОУ ОГУ 140601. 4106.03 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Голубь Н.В.			Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Кутарев А.М.				К	3	
Н.контр.		Кутарева В.И.			Пояснительная записка	ЭЭФ, группа 02 ЭМ		
Утверд.		Никиян Н.Г.						