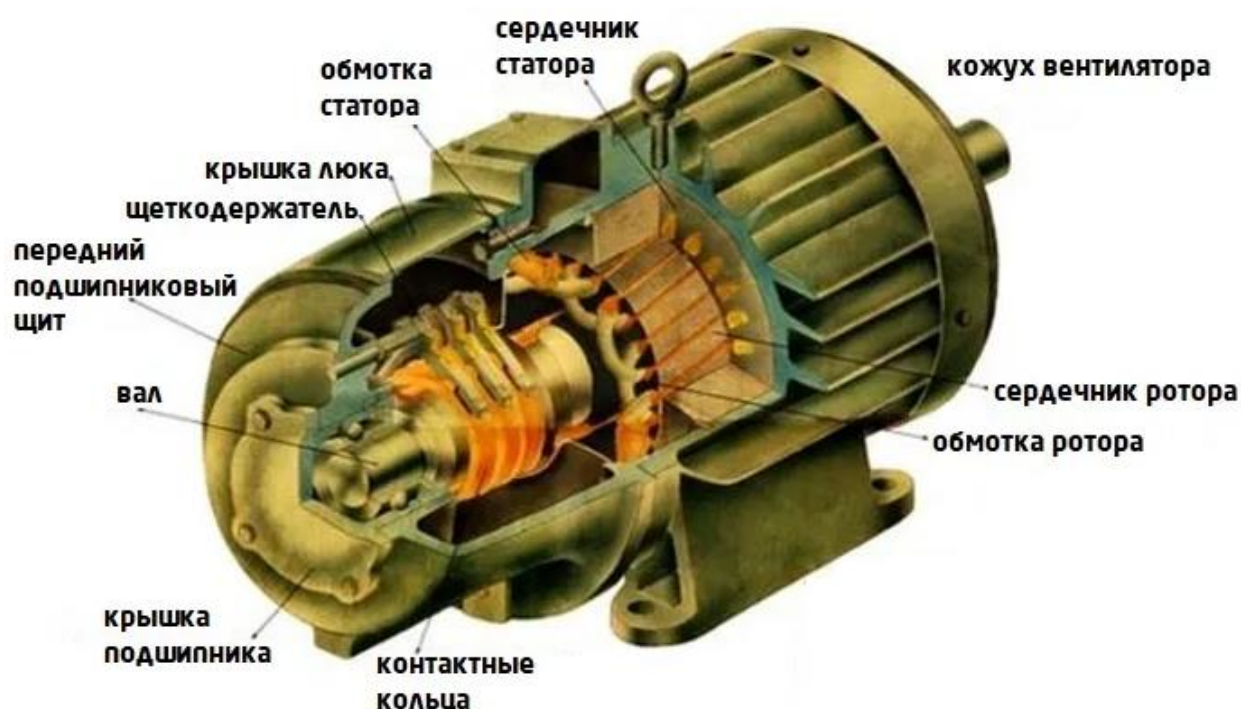


Ж. А. ЗАРАНДИЯ, А. В. КОБЕЛЕВ, Ю. А. КОЗЛОВА, А. Н. КАГДИН

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

Ж. А. ЗАРАНДИЯ, А. В. КОБЕЛЕВ, Ю. А. КОЗЛОВА, А. Н. КАГДИН

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Утверждено Ученым советом университета
в качестве учебного пособия для студентов направления
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2023

УДК 621.313.333.2
ББК 035я73
Р24

Рецензенты:

Начальник Оперативно-ситуационного отдела
ЦУС филиала ПАО
«Россети Центр»-«Тамбовэнерго»
А. А. Иванов

Доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе ФГБОУ ВО «ТГТУ»
Д. Ю. Муромцев

Р24 **Расчет** трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [Электронное издание] : учебное пособие / Ж. А. Зарандия, А. В. Кобелев, Ю. А. Козлова, А. Н. Кагдин. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 2,05 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-2613-2

Рассмотрены основные вопросы проектирования и расчета асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Включает в себя рекомендации по расчету главных размеров двигателя, активной части двигателя, обмоток статора, воздушного зазора, обмоток короткозамкнутого ротора, магнитной цепи, потерь мощности и КПД, рабочих характеристик, пусковых параметров, тепловому расчету и расчету вентиляции. Приведены расчетные формулы, схемы, графики.

Предназначено для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

УДК 621.313.333.2
ББК 035я73

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2613-2

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2023

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронная машина – это электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора.

Асинхронные машины сегодня составляют большую часть электрических машин. Они обладают свойством обратимости, но в основном применяются в качестве электродвигателей и являются основными преобразователями электрической энергии в механическую.

К достоинствам асинхронных машин можно отнести следующее: простота в изготовлении и обслуживании, отсутствие механического контакта со статической частью машины.

Асинхронные двигатели общего назначения, созданные на базе единых серий, получили широкое применение во всех отраслях промышленности. Единые серии двигателей позволяют значительно облегчить выбор, установку, обслуживание и ремонт оборудования в процессе его эксплуатации.

Двигатели единых серий постоянно модифицируются с учетом требований современных электроприводов при максимально возможном использовании их базовых узлов и деталей.

Данное пособие позволит студентам наиболее детально изучить конструкцию асинхронного двигателя, спроектировать и рассчитать новую, модернизированную машину на базе выпускаемых ранее асинхронных двигателей серии 4А.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором серии 4А общепромышленного исполнения соответствуют общим требованиям и предназначены для нормальных условий эксплуатации. Как правило, такие двигатели имеют степень защиты *IP23* или *IP44*.

IP23 – брызгозащищенное исполнение (рис. 1).

Такие машины имеют защиту от проникновения к токоведущим и вращающимся частям капель воды или водяных брызг. В этих машинах все отверстия, расположенные в верхней части корпуса, закрывают глухими крышками; отверстия, расположенные сбоку, защищают кожухами, крышками и жалюзи, а отверстия, расположенные снизу, защищают сетками. Такие двигатели могут работать на открытом воздухе.

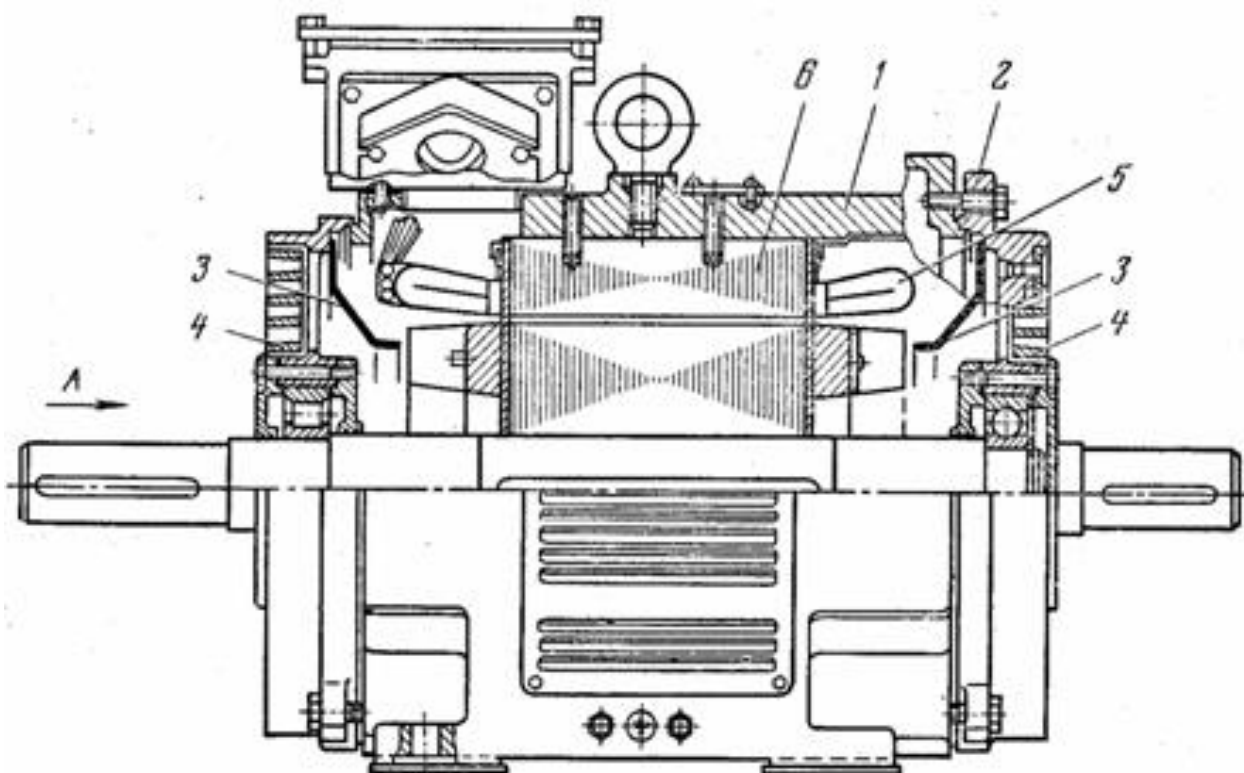
IP44 – закрытое исполнение (рис. 2)

Внутреннее пространство такой машины изолировано от внешней среды, поэтому их применяют для работы в пыльных помещениях, на электротранспорте и пр.

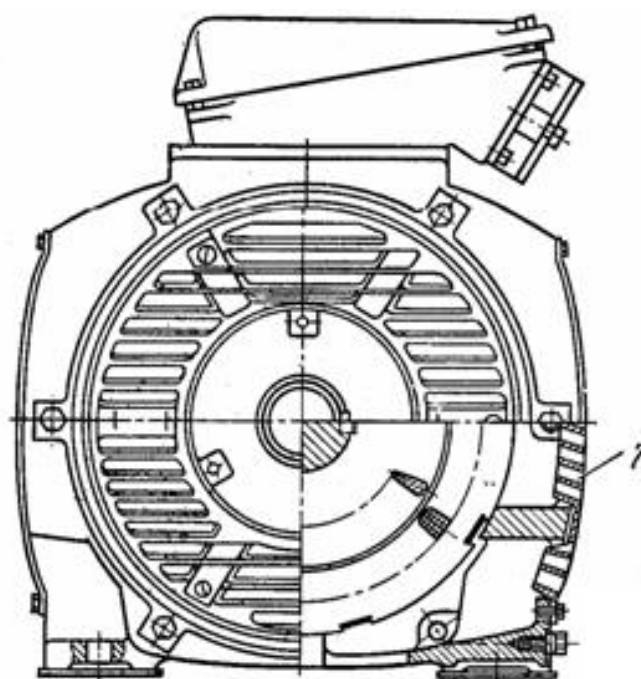
АД серии 4А выпускают на мощность от 0,06 до 400 кВт. В основу разделения на типоразмеры положена высота оси вращения h , мм, – это расстояние от оси вращения до опорной плоскости (рис. 3). Все величины высоты оси вращения стандартизованы.

По высоте оси вращения и числу полюсов выбирается наружный диаметр статора.

Двигатели с высотой оси вращения до 132 мм имеют систему изоляции класса нагревостойкости *B*, при большей высоте (160...355 мм) – класса нагревостойкости *F*.



a)



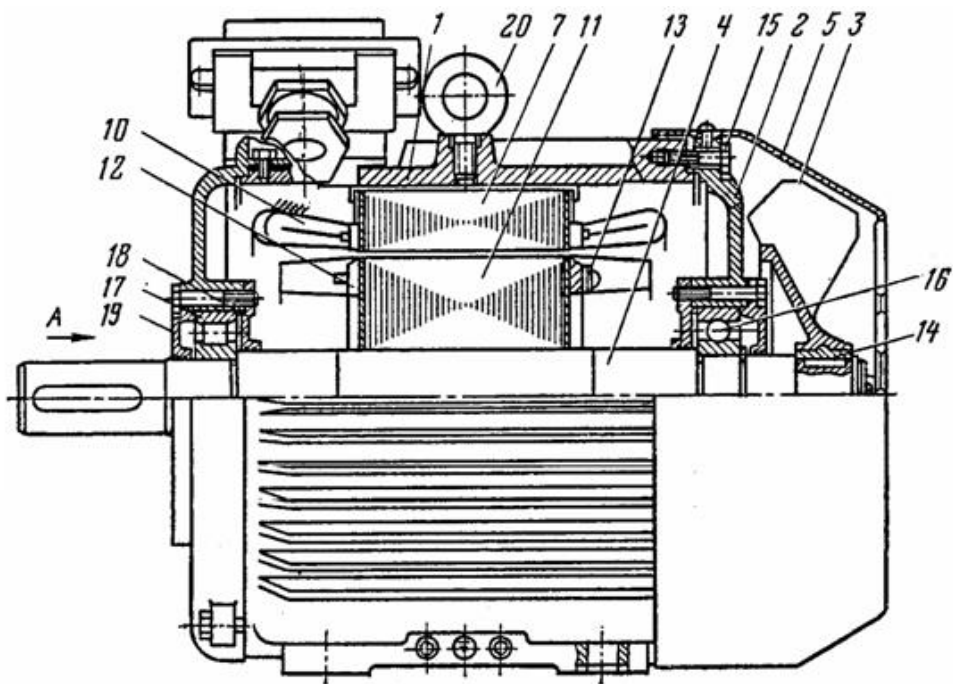
б)

Рис. 1. Устройство асинхронного двигателя серии 4А со степенью защиты IP23:

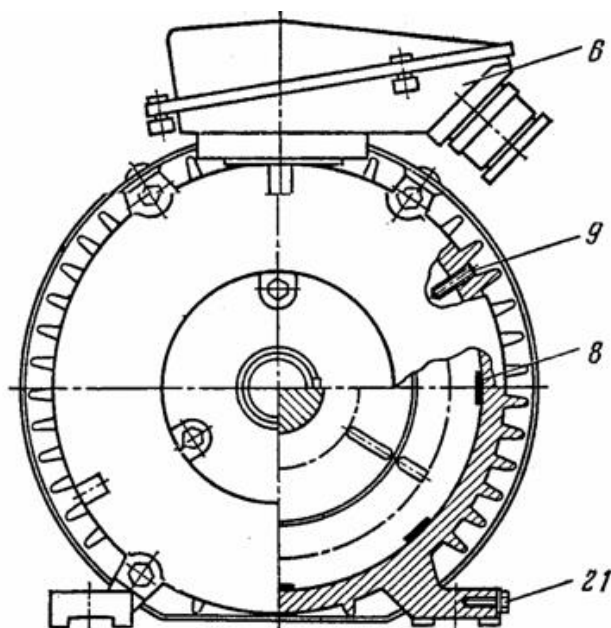
a – общий вид; *б* – продольный и поперечный разрезы;

1 – станина; 2 – подшипниковые щиты; 3 – диффузор; 4 – жалюзи;

5 – обмотка; 6 – сердечник статора; 7 – выходные отверстия станины



a)



б)

Рис. 2 Устройство асинхронного двигателя серии 4А со степенью защиты IP44:

a – общий вид; *б* – продольный и поперечный разрезы;

1 – станина; 2 – торцевые щиты; 3 – наружный вентилятор; 4 – вал; 5 – кожух; 6 – коробка выводов; 7 – сердечник статора; 8 – скобы; 9 – стопорный винт; 10 – обмотка всыпная;

11 – сердечник ротора; 12 – замыкающие кольца; 13 – балансировочный груз; 14 – втулка;

15 – болт; 16, 17 – обоймы подшипников; 18, 19 – подшипниковые крышки;

20 – рым-болт; 21 – болты для подсоединения шин заземления

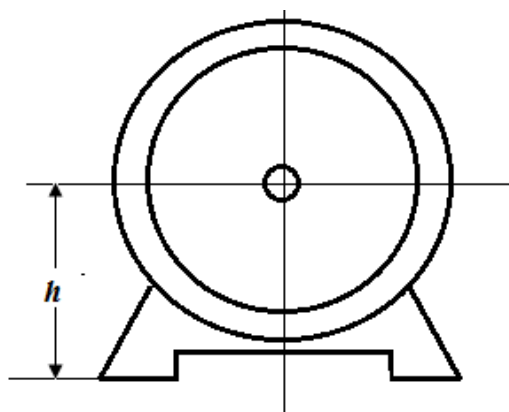


Рис. 3. Высота оси вращения АД

В статорах двигателей высотой оси вращения до 160 мм применяют однослойную обмотку, в остальных – двухслойную.

Структура обозначения АД серии 4А

4АХ₁ Х₂ Х₃ Х₄ Х₅ Х₆ Х₇

4 – серия;

А – асинхронный (двигатель);

Х₁ – исполнение по способу защиты, наличие буквы Н обозначает закрытое исполнение двигателя IP23, отсутствие буквы означает защищенное исполнение IP44 (необходимо учитывать при выборе параметров вентиляционных каналов)

Х₂ – исполнение АД по материалу станины и щитов: буква А обозначает, что станина и щиты выполнены из алюминия; Х – станина алюминиевая, щиты чугунные (или наоборот); отсутствие буквы – станина и щиты чугунные или стальные;

Х₃ – высота оси вращения, мм;

Х₄ – установочный размер по длине станины: буквы S, М или L (различают меньший – S, средний – М или больший – L);

Х₅ – длина сердечника: А – меньшая, В – большая при условии сохранения установочного размера; отсутствие буквы означает, что при данном установочном размере (S, М или L) выполняется только одна длина сердечника;

Х₆ – число полюсов 2р;

Х₇ – климатическое исполнение и категория размещения.

Двигатели общепромышленного назначения рассчитаны на работу в районах умеренного климата, используются для привода механизмов без повышенных требований к пусковым и регулировочным характеристикам. Они работают от трехфазной сети с частотой 50 Гц и напряжениями, указанными в табл. 1.

Для двигателей основного назначения принята увязка установочных размеров с номинальными мощностями и синхронными частотами вращения. Это необходимо учитывать при проектировании АД общего назначения. Некоторые из них для разной степени защиты приведены в табл. 2а и 2б.

Таблица 1

$P_{\text{ном}}$, кВт	$U_{\text{ном}}$, В
0,06...0,37	220; 380
0,55...11	220; 380; 660
15...116	220/380; 380/660
132...400	380/660

Таблица 2а

Высота оси вращения h , мм	Условное обозначение длины станины	Номинальная мощность, кВт, двигателей со степенью защиты IP23 при 2р					
		2	4	6	8	10	12
160	S	22	18,5	11	7,5	–	–
	M	30	22	15	11	–	–
180	S	37	30	18,5	15	–	–
	M	45	37	22	18,5	–	–
200	M	55	45	30	22	–	–
	L	75	55	37	30	–	–
225	M	90	75	45	37	–	–
250	S	110	90	55	45	–	–
	M	132	110	75	55	–	–
280	S	160	132	90	75	–	–
	M	200	160	110	90	–	–
315	S	–	200	132	110	75	55
	M	250	250	160	132	90	75
355	S	315	315	200	160	110	90
	M	400	400	250	200	132	110

Таблица 2б

Высота оси вращения h , мм	Условное обозначение длины станины	Номинальная мощность, кВт, двигателей со степенью защиты IP44 при $2p$					
		2	4	6	8	10	12
132	S	–	7,5	5,5	4	–	–
	M	11	11	7,5	5,5	–	–
160	S	15	15	11	7,5	–	–
	M	18,5	18,5	15	11	–	–
180	S	22	22	–	–	–	–
	M	30	30	18,5	15	–	–
200	M	37	37	22	18,5	–	–
	L	45	45	30	22	–	–
225	M	55	55	37	30	–	–
250	S	75	75	40	37	–	–
	M	90	90	55	45	–	–
280	S	110	110	75	55	–	–
	M	132	132	90	75	–	–
315	S	160	160	110	90	55	45
	M	200	200	132	110	75	55
355	S	250	250	160	132	90	75
	M	315	315	200	160	110	90

Для снижения потерь на вихревые токи сердечники статора и ротора набирают из листовой электротехнической стали. Выбор марки стали зависит от высоты оси вращения машины. Способ изоляции листов влияет на коэффициент заполнения сталью k_c (табл. 3).

В машине защищенного исполнения, если длина сердечников статора и ротора превышает 450 мм, предусмотрены радиальные вентиляционные каналы, в АД меньших размеров с литой короткозамкнутой клеткой их не применяют ввиду технологической сложности выполнения.

Таблица 3

h , мм	Марка стали	k_c статора	k_c ротора
50...250	2013	0,97	0,97
280...355	2312	0,95	0,97

При расчете и проектировании АД необходимо учитывать, что двигатель должен иметь хорошие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности), высокую надежность работы, минимальные габаритно-установочные размеры, массу и стоимость, простую конструкцию, быть удобным в обслуживании и эксплуатации.

Каждая электрическая машина предназначена для работы в четко определенных условиях эксплуатации: режим нагрузки, допустимые перегрузки, напряжение, частота переменного тока, частота вращения, температура охлаждающей среды, влажность, запыленность и т.д. В то же время машина должна развивать номинальную мощность и работать без аварий и повреждений в течение установленного времени.

Для надежной работы машины при ее проектировании необходимо предусмотреть достаточный резерв, использовать высококачественную технологию изготовления, в процессе эксплуатации следить за своевременным и качественным техническим обслуживанием.

При проектировании двигателя необходимо обеспечить следующее:

1. Для того чтобы машина без повреждений и деформаций выдерживала кратковременные перегрузки по току и напряжению, а также кратковременные превышения номинальной частоты вращения, необходимо обеспечить достаточную механическую прочность вала, станины, ротора, статора, деталей крепления обмоток и пр.

2. Должна быть обеспечена достаточная электрическая прочность изоляции, для чего при проектировании машины необходимо обратить внимание на класс изоляции обмоток.

3. Так как при работе двигателя происходит нагрев его основных элементов, необходимо обеспечить достаточное охлаждение машины. Способ охлаждения зависит от вида исполнения машины и ее мощности.

Машины малой и средней мощности обычно выполняют с самовентиляцией.

2. РАСЧЕТ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ДВИГАТЕЛЯ

Главными размерами АД считают внутренний диаметр сердечника статора D и его расчетную длину l_i .

Сначала по заданной высоте оси вращения выбираем наружный диаметр статора (табл. 4).

Таблица 4

h , мм	132	160	180	200	225	250	280	315	355
D_a , м	0,225	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

Внутренний диаметр статора D определяют по приближенному выражению

$$D = K_D D_a.$$

Значения коэффициента K_D в зависимости от количества полюсов представлены в табл. 5.

Таблица 5

$2p$	2	4	6	8...12
K_D	0,52...0,57	0,64...0,68	0,70...0,72	0,74...0,77

Полюсное деление определяют из выражения

$$\tau = \pi D / 2p.$$

Расчетная мощность асинхронного двигателя определяется по заданной номинальной мощности:

$$P' = P_2 k_E / (\eta' \cos \varphi'),$$

где k_E – коэффициент, равный отношению ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, определяется из рис. 4.

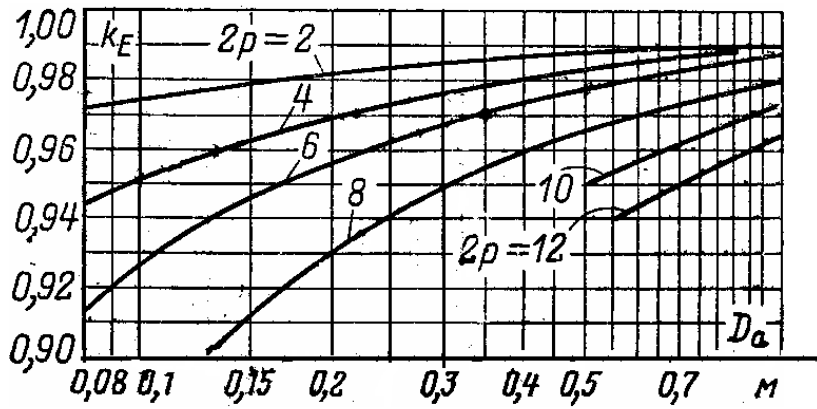


Рис. 4. Значения коэффициента k_E

Предварительные значения $\cos\varphi'$ и η' находят по кривым рис. 5.

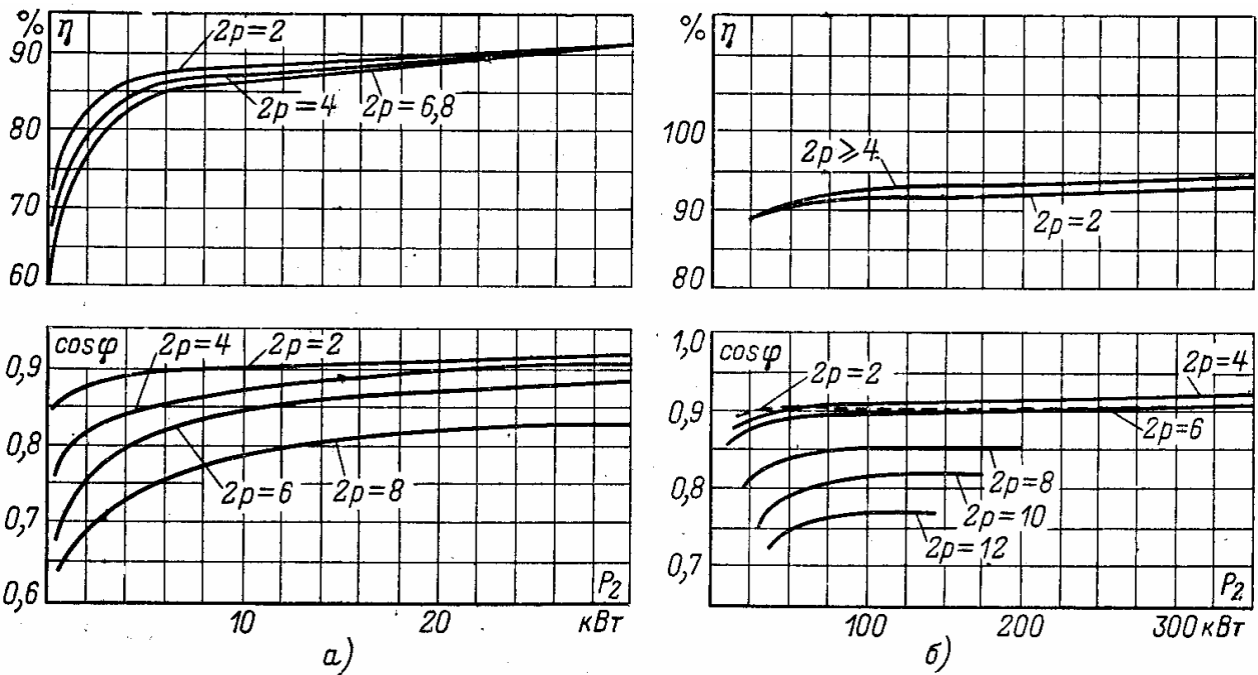


Рис. 5. Предварительные значения $\cos\varphi'$ и η' :

а – мощностью до 30 кВт; б – мощностью до 400 кВт

Предварительный выбор значений максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки $B_\delta', \text{ Гл}, A', \text{ А/м}$, необходим для определения расчетной длины сердечника и проводится по кривым на рис. 6.

Предварительно принимаем коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_\delta = 2/\pi \approx 0,64$ и коэффициент формы поля $k_B = \pi/2\sqrt{2} \approx 1,11$.

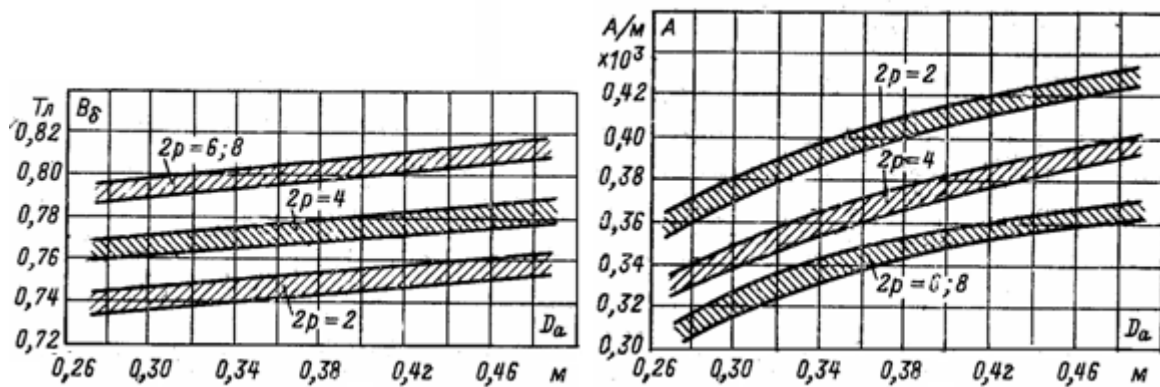


Рис. 6. Электромагнитные нагрузки АД при высоте оси вращения $h \geq 132$ мм

Предварительное значение обмоточного коэффициента для однослойной обмотки принимаем $k_{об} = 0,95 \dots 0,96$, для двухслойных и однослойных обмоток при $2p = 2$ принимаем $k_{об} = 0,90 \dots 0,91$, при большем количестве полюсов – $k_{об} = 0,91 \dots 0,92$

Расчетная длина сердечника статора определяется из выражения

$$l_{ст} = \frac{8,66 \cdot 10^{12} \cdot P'}{k_{об} \cdot n_1 \cdot D^2 \cdot B_d' \cdot A'}$$

где n_1 – синхронная частота вращения магнитного поля АД, об/мин.

Полученное значение расчетной длины статора следует округлить до 5 мм.

Конструктивная длина сердечника ротора в машинах с $h \leq 250$ принимают равной длине сердечника статора $l_{ст} = l_p$, в двигателях больших габаритов ротор выполняют длиннее статора на 5 мм, а в машинах высокого напряжения – на 10 мм.

Расчет главных размеров двигателя заканчивается определением коэффициента длины, значения которого должны укладываться в диапазоне 0,5...0,8:

$$\lambda = l_i / D.$$

3. РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ДВИГАТЕЛЯ

Как было сказано выше, сердечники статора и ротора АД набирают из листовой электротехнической стали. Марка применяемой стали зависит от высоты оси вращения двигателя (табл. 3).

Величина воздушного зазора δ между статором и ротором оказывает значительное влияние на технико-экономические показатели двигателя. Увеличение воздушного зазора приводит к увеличению тока намагничивания статора, что в свою очередь приводит к снижению КПД двигателя. Чрезмерно большое уменьшение воздушного зазора приводит к увеличению дополнительных потерь и, соответственно, к снижению КПД, в то время как даже незначительная неравномерность воздушного зазора может вызвать увеличение нагрузки на подшипники и вал и создает опасность удара ротора о внутреннюю поверхность статора.

Размеры активной части статора двигателя представлены на рис. 7.

Для АД общего назначения воздушный зазор выбирают по графикам (рис. 8).

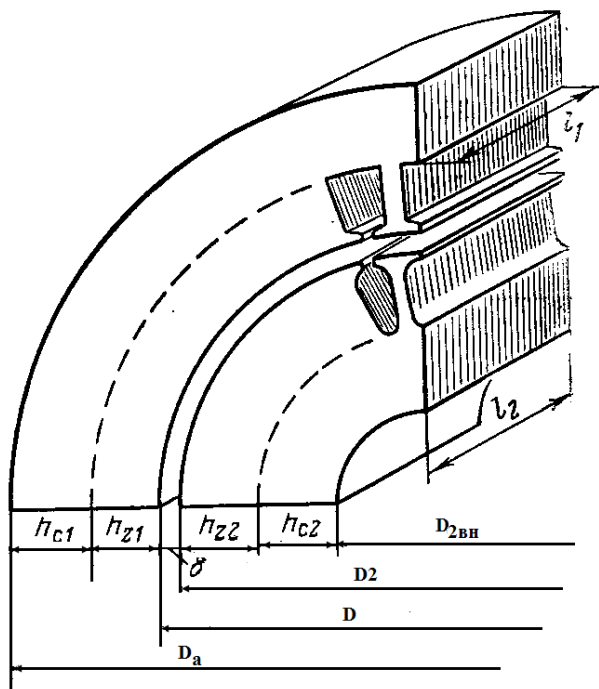


Рис. 7. Активная часть АД

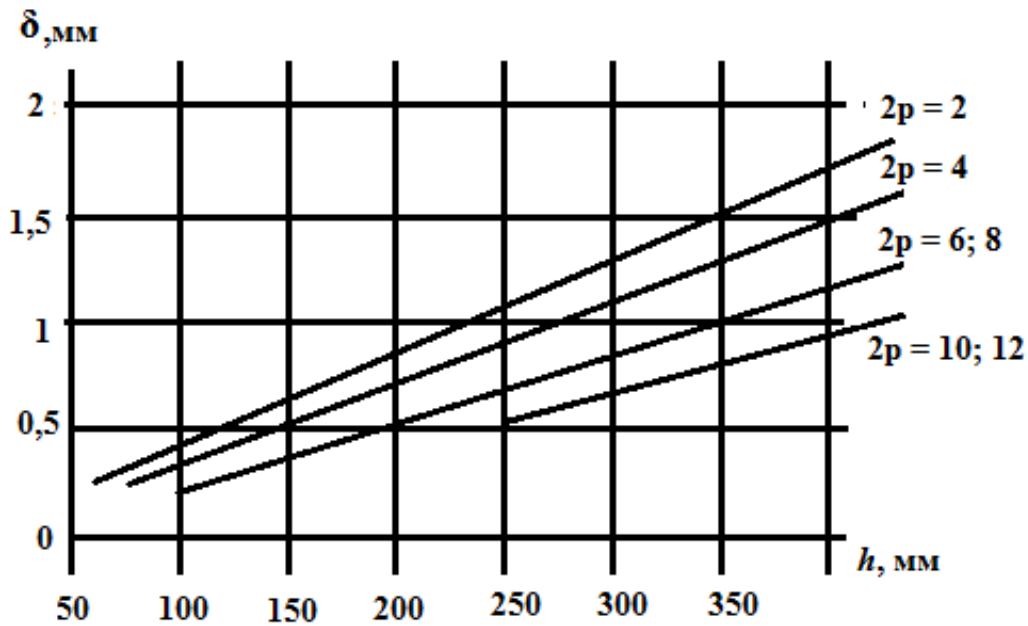


Рис. 8. Величина воздушного зазора АД

Наружный диаметр сердечника ротора, мм

$$D_2 = D - 2\delta.$$

Внутренний диаметр сердечника ротора $D_{2вн}$, мм, приближенно принимают

$$D_{2вн} \approx (0,30 \dots 0,35)D_2.$$

При расчете вала на жесткость значение $D_{2вн}$ необходимо уточнить.

Если в сердечнике статора не предусмотрены радиальные вентиляционные каналы, то его длина будет равна его расчетной длине $l_1 = l_i$.

Если радиальные вентиляционные каналы предусмотрены, то конструктивная длина сердечника статора равна

$$l_1 = l_i + n_k b_k.$$

Число радиальных каналов n_k при их ширине $b_k = 10$ мм принимается таким, чтобы длина средних пакетов статора была 80 ... 100 мм, а крайних несколько больше.

Число и ширину радиальных вентиляционных каналов в сердечнике ротора принимают такими же, как и в статоре (табл. 6).

При габарите двигателя более 180 мм в сердечнике ротора предусматривают один ряд аксиальных вентиляционных каналов.

Таблица 6

h , мм	$2p$	Исполнение двигателя по способу защиты			
		IP44		IP23	
		n_k	d_k	n_k	d_k
180	2	–	–	–	–
	4, 6, 8	10	18	10	18
200	2	12	12	12	12
	4	12	16	12	16
	6, 8	12	22	12	22
225	2	12	12	12	12
	4	12	20	12	20
	6, 8	12	25	12	25
250	2	12	15	12	15
	4	10	25	10	25
	6, 8	10	30	10	30
280, 315	2	12	20	–	–
	4	12	32	12	26
	6, 8, 10	12	32	12	40
355	2	12	20	–12	–
	4, 6, 8, 10, 12	12	40		40

Соотношение числа пазов статора и короткозамкнутого ротора Z_1/Z_2 оказывает большое влияние на трудоемкость изготовления двигателя и его свойства, поэтому при проектировании машины необходимо учесть, что увеличение числа пазов, хотя и способствует синусоидальности МДС, усложняет технологию изготовления машины.

Для выбора оптимального соотношения пазов можно пользоваться табл. 7.

Высота оси вращения h , мм	Z_1/Z_2 при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
132	24/19	36/34	54/51	48/44	—	—
160	36/28	48/38	54/50	48/44		
180, 200	36/28	48/38	72/58	72/58		
225	36/28	48/38	72/56	72/56		
250	48/40	60/50	72/56	72/56	90/76	—
280...355	48/38	60/50	72/82	72/86	90/106	90/106

На практике применяют следующие формы пазов сердечника статора (рис. 9).

Трапецидальная форма паза

Достоинства: уменьшение магнитного напряжения зубцов и воздушного зазора, а также пульсации магнитной индукции и снижение добавочных потерь.

Недостатки: небольшой коэффициент заполнения паза медью.

Область их применения зависит от возможности применения всыпной обмотки статора, выполняемой из проводов круглого сечения.

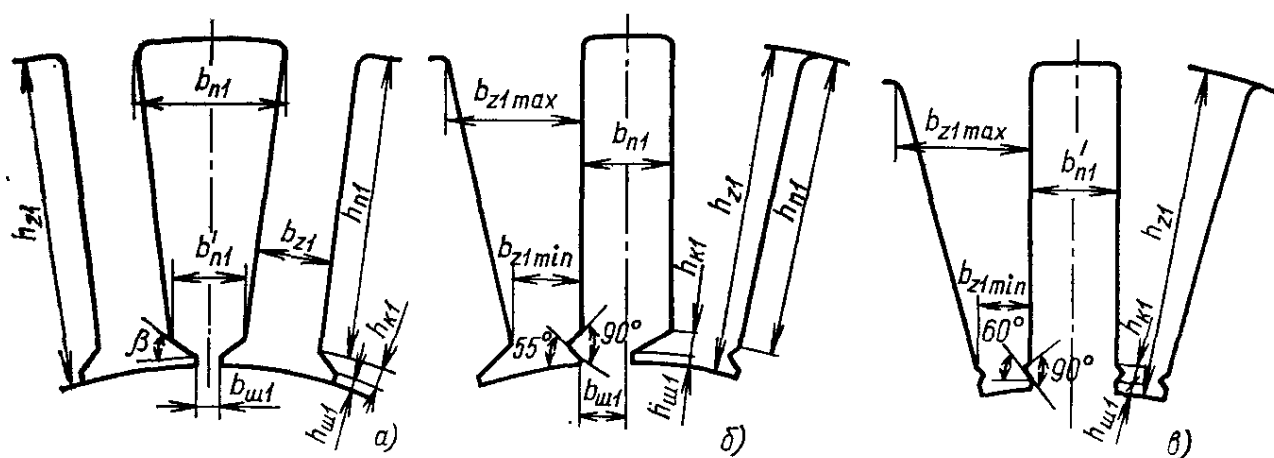


Рис. 9. Пазы статора АД:

a – полузакрытый трапецидальный; *б* – полукоткрытый прямоугольный;

в – открытый прямоугольный

Пазы прямоугольной формы

Достоинства: более высокий коэффициент заполнения паза медью, чем в трапецеидальных пазах.

Недостатки: увеличение магнитного напряжения и добавочных потерь, усиление пульсаций магнитной индукции в воздушном зазоре.

Рекомендации по выбору формы паза и типа обмотки в зависимости от высоты вращения и числа полюсов двигателей приведены в табл. 8.

Таблица 8

Высота оси вращения h , мм	$2p$	Форма пазов статора	Тип обмотки статора	Рекомендуемые значения магнитной индукции, Тл	
				B_{z1max}	B_{c1}
≤ 132	2, 4	Трапецеидальная	Однослойная всыпная	1,75...1,95	1,50...1,65
	6			1,75...1,95	1,45...1,60
	8			1,7...1,9	1,20...1,35
160	2	Трапецеидальная	Двухслойная всыпная	1,75...2,00	1,45...1,70
	4		Однослойная всыпная	1,75...2,00	1,45...1,70
	6		Однослойная всыпная	1,7...1,85	1,35...1,50
	8		Однослойная всыпная	1,7...1,85	1,1...1,2
180...250	2	Трапецеидальная	Двухслойная всыпная	1,7...1,9	1,45...1,65
	4, 6		Одно-, двухслойная всыпная	1,7...1,9	1,45...1,65
	8		Двухслойная всыпная	1,70...1,85	1,1...1,2
280...355	2, 4	Прямоугольные полуоткрытые	Двухслойная из полужестких полукатушек	1,7...1,9	1,4...1,6
	6, 8	Прямоугольные полуоткрытые	Двухслойная из полужестких полукатушек	1,7...1,9	1,4...1,6
	10	Трапецеидальные полузакрытые	Двухслойная концентрическая всыпная	1,6...1,8	1,3...1,45
	12	Трапецеидальные полузакрытые	Двухслойная концентрическая всыпная	1,6...1,8	1,15...1,30

Таблица 9

Высота оси вращения h , мм	Припуски, мм	
	по ширине паза $b_{\text{п}}$	по высоте паза $h_{\text{п}}$
≤ 132	0,1	0,1
160...250	0,2	0,2
280...355	0,3	0,3

Припуски на штамповку по высоте $h_{\text{п}}$ и ширине $b_{\text{п}}$ паза указаны в табл. 9.

Трапецеидальные пазы.

При расчете размеров трапецеидальных полузакрытых пазов необходимо учитывать, что зубец должен иметь параллельные стенки.

Ширина зубца, мм, определяется по допустимому значению магнитной индукции в зубце статора $B_{z1\text{max}}$ (табл. 9):

$$b_{z1} = t_1 B'_\delta / (k_{c1} B_{z1\text{max}}),$$

где зубцовое деление статора

$$t_1 = \pi D / Z_1.$$

В АД с высотой оси вращения $h \leq 160$ мм пазы ротора скашивают, как правило, на одно зубцовое деление статора, что позволяет уменьшить высшие гармонические ЭДС, вызванные пульсациями магнитного потока из-за наличия зубцов, улучшить пусковые характеристики и снизить уровень шума. При большей высоте вращения скоса пазов не делают, так как это не дает значительных улучшений пусковых характеристик, но усложняет технологический процесс изготовления двигателя.

Высота зубца, мм:

$$h_{z1} = 0,5(D_1 - D) - h_{c1}.$$

Высота спинки статора, мм:

$$h_{c1} = \frac{0,5\alpha'_i \tau B'_\delta}{k_{c1} B_{c1}},$$

где $\tau = \pi D / 2p$.

Наименьшая ширина трапецеидального полузакрытого паза в штампе, мм:

$$b'_{п1} = t'_1 - b'_{z1},$$

$$t'_1 = \frac{\pi(D + 0,2h_{z1})}{Z_1}.$$

Наибольшая ширина трапецеидального полузакрытого паза в штампе, мм:

$$b_{п1} = t_1 - b_{z1},$$

$$t_1 = \frac{\pi(D + 2h_{z1})}{Z_1}.$$

Ширина шлица паза статора $b_{ш1} \leq 4$ мм, диаметр изолированного провода $d_{из} < 1,76$ мм, высота шлица $h_{ш1} \approx 0,8 \dots 1,2$ мм, угол $\beta = 45^\circ$ при высоте оси вращения $h \leq 250$ мм, а при $h \geq 280$ мм $\beta = 30^\circ$.

Тогда высота клиновой части паза при $\beta = 45^\circ h_{к1} = 0,5(b'_{п1} - b_{ш1})$, а при $\beta = 30^\circ h_{к1} = 0,29(b'_{п1} - b_{ш1})$.

Площадь поперечного сечения трапецеидального паза в штампе, мм²:

$$S_{п1} = 0,5(b_{п1} + b'_{п1})h_{п1} + 0,5(b_{п1} + b_{ш1})h_{к1} + b_{ш1}h_{ш1},$$

$$h_{п1} = h_{z1} - h_{к1} - h_{ш1}.$$

Прямоугольные полуоткрытые пазы.

Ширина зубца в узком месте, мм:

$$b_{z1min} = t_1 B'_\delta / (k_{c1} B_{z1max}).$$

Ширина полуоткрытого паза в штампе, мм:

$$b_{п1} = t'_1 - b_{z1min},$$

$$t'_1 = \frac{\pi(D + 2h_{ш1} + 2h_{к1})}{Z_1}.$$

Для полуоткрытых пазов отношение $b_{п1} / t'_1 \approx 0,46 \dots 0,56$. Чем меньше диаметр D , тем больше отношение.

Высота шлица, мм:

$$h_{ш1} = 0,8 \dots 1,2.$$

Высота клиновой части паза при $2p = 2h_{к1} = 3,5$ мм, при $2p = 4, 6$ и 8 $h_{к1} = 3$.

Ширину шлица принимают $b_{ш1} \approx (0,58 \dots 0,60)b_{п1}$.

Высота паза

$$h_{z1} = 0,5(D_1 - D) - h_{c1}.$$

Высота паза, занимаемого обмоткой, мм:

$$h_{п1} = h_{z1} - h_{ш1} - h_{к1}.$$

Размеры прямоугольных открытых пазов определяют аналогично.

Пазы ротора.

Форму пазов короткозамкнутого ротора выбирают в зависимости от мощности двигателя, числа полюсов $2p$ и требуемых пусковых характеристик.

Форму пазов короткозамкнутого ротора выбирают в зависимости габаритов машины и числа полюсов. В небольших двигателях по условиям изготовления удобно применить пазы овальной формы (рис. 10, *а* и *б*). Для двухполюсных двигателей обычно используют пазы бутылочной формы, или овальные пазы с уменьшенным сечением в верхней части (рис. 10, *в* и *г*), в которых явление вытеснения тока в стержнях ротора проявляется более эффективно. Все это способствует улучшению пусковых свойств АД с КЗР. Для двигателей с $2p \geq 4$ целесообразно применить пазы (рис. 10, *а* и *б*).

Рекомендации по выбору пазов АД общего назначения представлены в табл. 10.

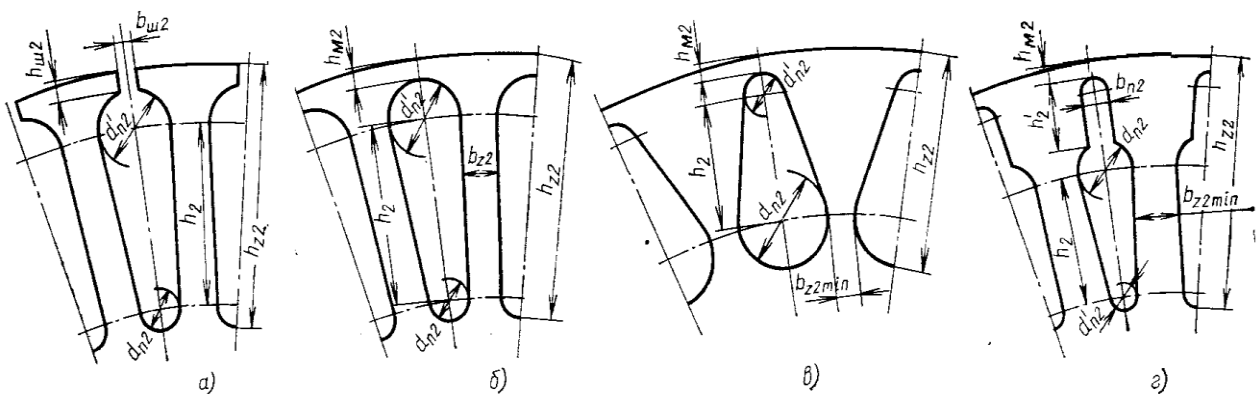


Рис. 10. Пазы короткозамкнутого ротора:

а – полузакрытый овальный; *б, в* – закрытый овальный; *г* – закрытый бутылочный

Таблица 10

Высота оси вращения h , мм	$2p$	Форма пазов статора по рис. 10	Рекомендуемые значения магнитной индукции, Тл	
			B_{z2max}	B_{c2}
≤ 132	2	a	1,75...1,95	1,35...1,45
	4	a	1,75...1,95	1,15...1,25
	6	a	1,75...1,95	1,05...1,15
	8	a	1,7...1,9	0,75...0,85
160...225	2	a	1,75...1,95	1,35...1,45
	4	b	1,55...1,80	1,20...1,45
	6	b	1,65...1,90	1,05...1,15
	8	b	1,65...1,90	0,75...0,85
250	2	c	1,65...1,90	1,35...1,45
	4	a	1,65...1,90	1,15...1,25
	6	a	1,65...1,90	1,05...1,15
	8	a	1,70...1,95	0,75...0,85
280-355	2	c	1,60...1,85	1,35...1,45
	4	b	1,8...2,0	1,15...1,25
	6	b	1,65...1,90	1,05...1,15
	8	b	1,65...1,90	0,75...0,85
	10, 12	b	1,65...1,90	0,75...0,85

Ширина зубца ротора b_{z2} , мм, определяется значением магнитной индукции в расчетном сечении зубца B_{z2max} (табл. 10):

$$b_{z2} = \frac{t_2 B'_\delta}{k_{c2} B_{z2max}},$$

где t_2 – зубцовое деление по наружному диаметру D_2 , мм:

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2},$$

k_{c2} – коэффициент заполнения сердечника ротора сталью.

Высота зубца ротора, мм:

$$h_{z2} = 0,5(D_2 - D_{2BH}) - h_{c2}.$$

Высота спинки сердечника ротора h_{c2} , мм, определяется допустимым значением магнитной индукции в спинке ротора B_{c2} :

$$h_{c2} = \frac{0,5\alpha'_i \tau B'_\delta}{k_{c2} B_{c2}}.$$

Размеры овальных пазов (рис. 10, *a* и *б*) рассчитывают таким образом, чтобы зубцы ротора имели параллельные стенки.

Диаметры пазов определяют по формулам:

– диаметр в верхней части паза

$$d'_{п2} = \frac{\pi(D_{2н} - 2h_{ш2}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 + \pi};$$

– диаметр в нижней части паза

$$d_{п2} = \frac{\pi(D_{2н} - 2h_{ш2}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 - \pi}.$$

Диаметр в нижней части паза $d_{п2}$ должен быть не менее 2 мм у двигателей с $h \leq 132$ мм и не менее 3,5 мм – у двигателей с $h \geq 160$ мм.

Расстояние между центрами окружностей овального паза

$$h_2 = h_{z2} - h_{ш2} - 0,5(d_{п2} + d'_{п2}).$$

В случае овального закрытого паза

$$d_{п2} = \frac{\pi(D_{2н} - 2h_{м2}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 + \pi},$$

$$h_2 = h_{z2} - h_{м2} - 0,5(d_{п2} + d'_{п2}),$$

где $h_{м2}$ – высота мостика, $h_{м2} = 0,5 \dots 1,0$ мм, для овальных полузакрытых пазов – $h_{м2} = 0,5 \dots 0,7$ мм, $b_{ш2} = 1,0 \dots 1,5$ мм.

При овальном закрытом пазе (рис. 10, *в*)

$$d_{п2} = \frac{\pi(D_{2н} - 2h_{м2}) - Z_2 b_{z2\min}}{Z_2 + \pi}.$$

Меньший диаметр этого паза принимают равным

$$d'_{п2} \approx (0,6 \dots 0,8).$$

Площадь поперечного сечения овального паза в штампе, мм²:

$$S_{п2} = 0,25\pi(d_{п2}^2 + d'_{п2}^2) + 0,5h_2(d_{п2} + d'_{п2}).$$

Для бутылочного паза (рис. 10, з) размеры нижней части выбирают из условия получения зубца с параллельными стенками. Ширину b_{z2min} определяют как

$$b_{z2min} = \frac{t_2 B'_\delta}{k_{c2} B_{z2max}}.$$

Большой диаметр нижней части паза

$$d_{п2} = \frac{\pi(D_{2н} - 2h_{м2} - 2h'_2) - Z_2 b_{z2min}}{Z_2 + \pi},$$

где $h_{м2} = 0,2 \dots 0,5$ мм, $h'_2 = 15$ мм.

Высоту зубца определяют как

$$h_{z2} = 0,5(D_2 - D_{2вн}) - h_{c2}.$$

Меньший диаметр нижней части паза

$$d'_{п2} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{z2}) - Z_2 b_{z2min}}{Z_2 - \pi}.$$

Расстояние между центрами диаметров нижней части бутылочного паза, мм:

$$h_2 = h_{z2} - h_{м2} - h'_2 - 0,5(d_{п2} + d'_{п2}).$$

Площадь поперечного сечения нижней части бутылочного паза, мм²:

$$S_{п2н} = 0,125\pi(d_{п2}^2 + d'_{п2}^2) + 0,5h_2(d_{п2} + d'_{п2}).$$

Ширину верхней части паза принимают равной

$$b_{п2} = (0,5 \dots 0,6)d_{п2}.$$

Площадь поперечного сечения верхней части паза в штампе, мм²:

$$S_{п2в} = 0,5d_{п2}(h'_2 - 0,25d_{п2}).$$

Площадь бутылочного паза

$$S_{п2} = S_{п2н} + S_{п2в}.$$

4. РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА

Обмотка статора асинхронного двигателя состоит из катушечных групп, соединенных между собой последовательно, параллельно, или последовательно-параллельно. В свою очередь каждая катушечная группа состоит из отдельных катушек – секций, которые представляют собой витки обмотки, уложенные в одну и ту же пару пазов. Катушки могут быть одновитковыми и многовитковыми (рис. 11)

Расстояние между пазами, в которые уложена катушка статорной обмотки, называется шагом обмотки и обозначается y_1 .

Расстояние между пазовыми частями одной катушки, измеренное в пазах, называют шагом обмотки.

Шаг обмотки, равный полюсному делению τ , называют полным диаметральной: $y_1 = \tau = Z_1/2p$, укороченным, если он меньше полюсного деления $y_1 < \tau$ и удлиненным, если $y_1 > \tau$.

Чем короче шаг, тем больше форма кривой распределения магнитной индукции, приближается к синусоиде, а, следовательно, уменьшаются добавочные потери.

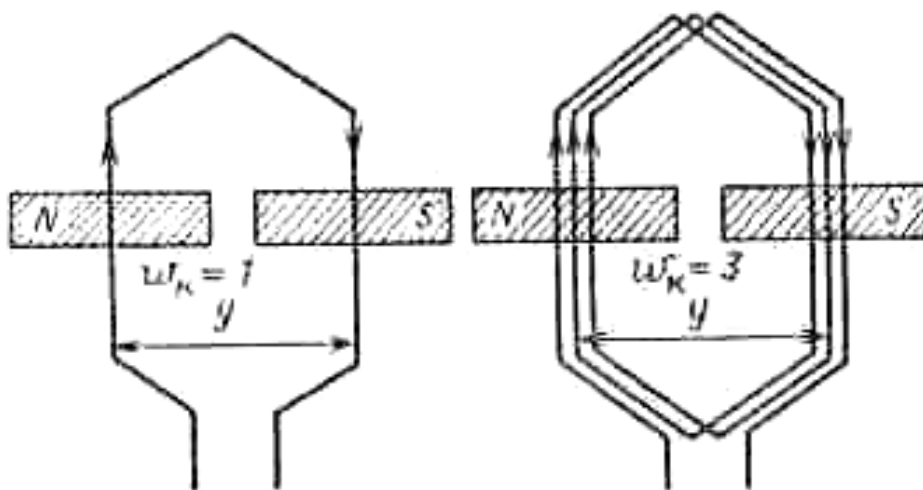


Рис. 11. Одновитковая и многовитковая секции (катушки) обмотки

Способ соединения катушечных групп влияет на количество параллельных ветвей a в обмотке одной фазы: при последовательном соединении $a = 1$, при параллельном соединении $a = 2p$, при параллельно-последовательном соединении можно получить $1 < a < 2p$.

Если пазовые стороны катушек расположены в пазах сердечника в один слой, обмотку называют однослойной, если в два слоя – двухслойной (рис. 12).

В АД с высотой оси вращения $h \leq 160$ мм применяют однослойные обмотки, при $h \geq 180$ мм применяют двухслойные обмотки с укороченным шагом. Так же применяют одно- и двухслойные концентрические обмотки, где каждая катушечная группа состоит из одной большой катушки, имеющей удвоенное число витков.

В зависимости от последовательности соединения катушек и их конфигурации различают петлевые и волновые обмотки (рис. 13).

В асинхронных машинах наибольшее распространение получили петлевые обмотки.

В зависимости от вида катушек обмотки статора разделяют на выпуклые с мягкими катушками из провода круглого сечения и обмотки с жесткими катушками из провода прямоугольного сечения.

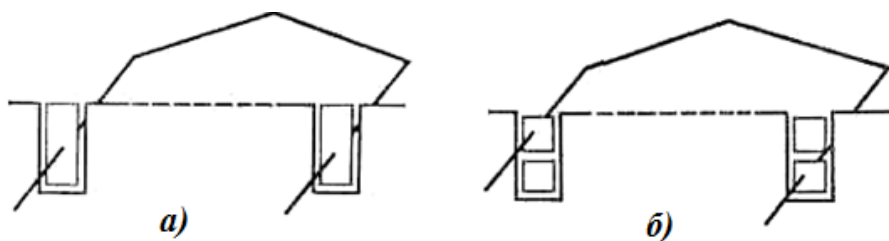


Рис. 12. Расположение в пазах секций однослойной (а) и двухслойной (б) обмоток

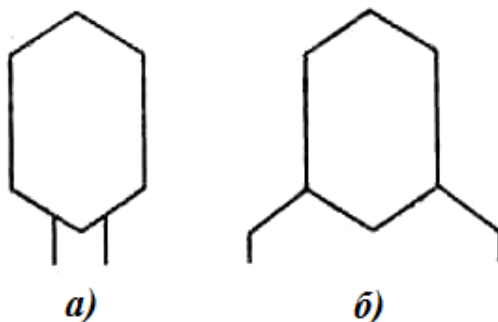


Рис. 13. Секции петлевой (а) и волновой (б) обмоток

При выборе обмотки статора АД можно воспользоваться рекомендациями, представленными в табл. 8.

Число пазов статора Z_1 в обмотке асинхронных машин должно быть кратно числу фаз, а число $q = Z_1/2pm$ в большинстве асинхронных машин должно быть целым.

Полученное при расчете число эффективных проводников в пазу u_n при применении двухслойной обмотки округляют до ближайшего целого или четного числа.

Порядок расчета:

1. Определяют предварительное число эффективных проводников в пазу u'_n при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют ($a = 1$):

$$u'_n = \pi D A / (I_{1н} Z_1),$$

где $I_{1н}$ – номинальный ток обмотки статора, А; A – принятое ранее значение линейной нагрузки, А/м.

2. Выбирают число параллельных ветвей обмотки a из ряда возможных для обмотки данного типа и заданного числа полюсов, при необходимости число эффективных проводников в пазу корректируют:

$$u_n = a \cdot u'_n$$

3. Полученное число u_n округляют до ближайшего целого или четного в зависимости от типа обмотки.

Окончательное число витков в фазе обмотки

$$W_1 = u_n Z_1 / 2am.$$

Окончательное значение линейной нагрузки, А/м:

$$A = 2I_{1н} W_1 m / \pi D.$$

Оно не должно отличаться от значения, принятого ранее более чем на 5%.

Площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки статора, мм²:

$$q_{1эф} = \frac{I_{ном}}{\alpha \cdot \Delta_1},$$

где Δ_1 – плотность тока в обмотке статора, А/мм².

При выборе плотности тока необходимо учитывать следующее: увеличение плотности тока в статорной обмотке способствует уменьшению расхода обмоточной меди, однако, приводит к росту активного сопротивления обмотки статора, что в свою очередь приводит к росту электрических потерь и, соответственно, к снижению КПД. Таким образом, уменьшение плотности тока приводит к росту КПД и повышению надежности обмотки за счет снижения ее температуры.

Для выбора Δ_1 удобно воспользоваться графиком, представленным на рис. 14.

Если при применении всыпной обмотки расчетное сечение эффективного проводника окажется выше указанного диаметра, то эффективный проводник разделяется на несколько элементарных, сечение и число которых, составляющих один эффективный проводник, выбирают по табл. 11. При этом должно выполняться условие

$$d_{\text{эл}} \leq d_{\text{ном}}$$

В свою очередь суммарная площадь сечения должна соответствовать следующему условию:

$$q_{\text{эл}} n_{\text{эл}} \approx q_{1\text{эф}}$$

где $q_{\text{эл}}$ и $n_{\text{эл}}$ – сечение и число элементарных проводников соответственно.

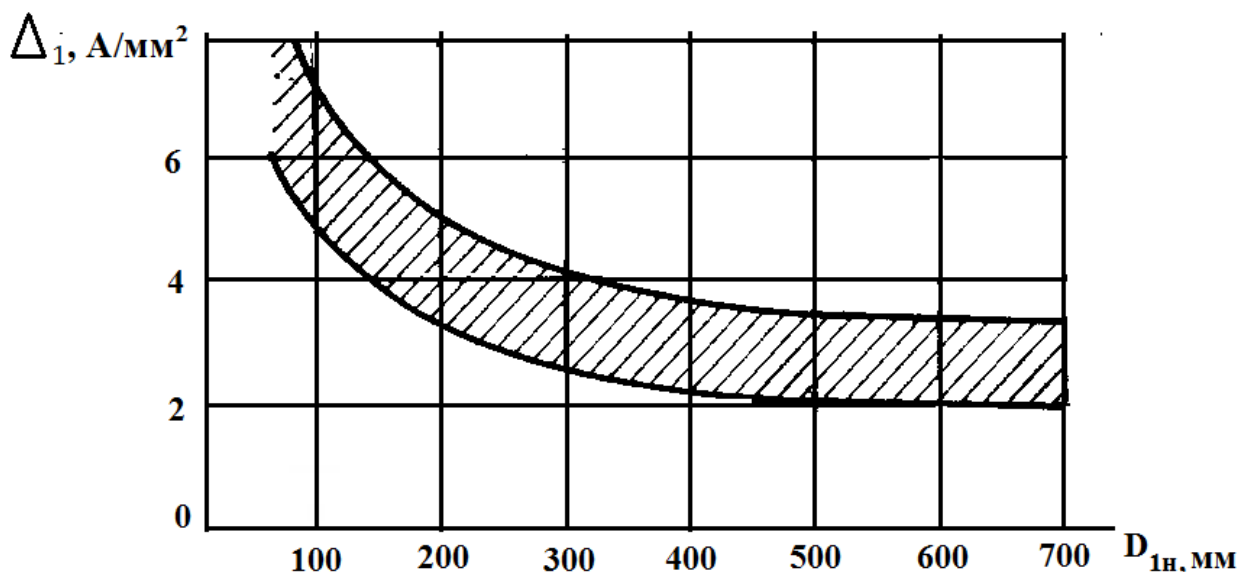


Рис. 14. Рекомендуемые значения плотности тока

11. Характеристики проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ²
0,125	0,147	0,01227
0,14	0,162	0,01539
0,15	0,18	0,01767
0,16	0,19	0,0201
0,17	0,20	0,0227
0,18	0,21	0,0255
0,20	0,23	0,0314
0,224	0,259	0,0394
0,25	0,285	0,0491
0,28	0,315	0,0616
0,315	0,350	0,0779
0,335	0,370	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,40	0,44	0,1257
0,425	0,465	0,1419
0,45	0,49	0,1590
0,50	0,545	0,1963
0,56	0,615	0,246
0,60	0,655	0,283
0,63	0,69	0,312
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442
0,80	0,865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,90	0,965	0,636

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ²
0,95	1,015	0,709
1,00	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,20	0,985
1,18	1,26	1,094
1,25	1,33	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,50	1,585	1,767
1,60	1,685	2,011

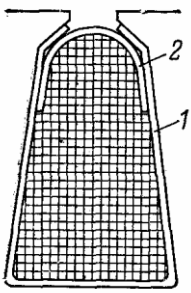
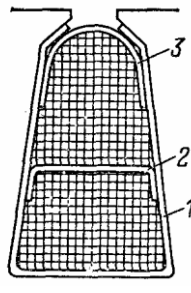
Схема статорной обмотки зависит от мощности машины. Машины мощностью до 12...15 кВт в большинстве случаев имеют однослойную концентрическую обмотку. Для асинхронных машин мощностью до 100 кВт и напряжением до 1 кВ предпочтительными являются всепные обмотки. В машинах большей мощности всепные обмотки выполняются двухслойными, а при механизированной укладке применяют одно-двухслойные или двухслойные концентрические обмотки, которые могут быть уложены в пазы без подъема шага. В двигателях на напряжение $U \geq 3$ кВ используют двухслойную обмотку прямоугольного сечения – жесткие катушки.

В таблице 12 приведены конструкции изоляции обмоток статора, применяемые в двигателях серии 4А.

Если обмотка в пазе размещена правильно, то коэффициент заполнения паза будет находиться в следующих пределах:

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 u_{п} n_{эл}}{S'_{п}} = 0,70...0,75.$$

Таблица 12

Тип обмотки	Высота оси вращения h , мм	Позиция	Односторонняя толщина, мм
 Однослойная	132	1	0,25
		2	0,35
	160	1	0,40
		2	0,50
 Двухслойная	≤ 250	1	0,40
		2	0,40
		3	0,50
	280...355	1	0,15
		2	0,45
		3	0,50

После окончательного выбора размеров провода статорной обмотки необходимо провести уточнение следующих параметров:

1. Плотность тока в обмотке статора

$$\Delta_1 = \frac{I_{\text{НОМ}}}{n_{\text{эл}} \cdot q_{1\text{эл}} \cdot \alpha_1}, \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

2. Значения электромагнитных нагрузок

$$A_1 = \frac{I_{1\text{НМ}} \cdot n_{\text{п}} \cdot Z_1}{10^{-3} \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \alpha_1}, \frac{\text{А}}{\text{м}},$$

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_1 \cdot \tau \cdot l_i \cdot 10^{-6}}, \text{Тл},$$

где Φ – основной магнитный поток

$$\Phi = \frac{k_E U_{1\text{НОМ}}}{4k_B f_1 \omega_1 k_{\text{об1}}}, \text{Вб}.$$

Размеры катушки статорной обмотки определяют в следующей последовательности:

1. Среднее зубцовое деление, мм:

$$t_{1cp} = \frac{\pi(D + h_{z1})}{Z_1}$$

2. Средняя ширина катушки, мм:

$$b_{1cp} = t_{1cp}y_{1cp}$$

3. Средняя длина любой части катушки, мм:

$$l_{л1} = (1,16 + 0,14\rho)b_{1cp} + 15.$$

4. Средняя длина витка обмотки статора, мм:

$$l_{cp1} = 2(l_1 + l_{л1}).$$

5. Длина вылета любой части:

при $h \leq 132$ мм

$$l_{в1} = (0,19 + 0,1\rho)b_{1cp} + 10,$$

при $h \geq 160$ мм

$$l_{в1} = (0,12 + 0,1\rho)b_{1cp} + 10.$$

Активное сопротивление одной фазы обмотки статора, приведенное к рабочей температуре, Ом

$$r_1 = \frac{\rho_{Cu} \cdot \omega_1 \cdot l_{1cp} \cdot 10^3}{n_{эл} \cdot q_{эл} \cdot \alpha_1}$$

где ρ_{Cu} – удельное электрическое сопротивление меди при рабочей температуре (табл. 13)

Таблица 13

Наименование	Удельное электрическое сопротивление, 10^{-9} Ом·м, при температуре, °С			Плотность, 10^4 кг/м ³
	20	75	115	
Медный провод	17,5	21,3	24,4	8,9
Алюминиевый провод	29,4	35,7	40,0	2,6...2,7
Литая алюми- ниевая клетка	36,6	46,5	48,8	

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при трапеци-
идальном полузакрытом пазе

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1}{3b'_{\text{п1}}} k_{\beta} + \left(\frac{h'_1}{b'_{\text{п1}}} + \frac{3h_{\text{к1}}}{b'_{\text{п1}} + 2b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} \right) k'_{\beta}.$$

При прямоугольном полуоткрытом пазе

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1 - h''_1}{3b'_{\text{п1}}} k_{\beta} + \left(\frac{h'_1}{b'_{\text{п1}}} + \frac{3h_{\text{к1}}}{b'_{\text{п1}} + 2b_{\text{ш1}}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} \right) k'_{\beta} + \frac{h''_1}{4b_{\text{п1}}}.$$

При прямоугольном открытом пазе

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_1 - h''_1}{3b'_{\text{п1}}} k_{\beta} + \left(\frac{h'_1 + h_{\text{к1}} + h_{\text{ш1}}}{b'_{\text{п1}}} \right) k'_{\beta} + \frac{h''_1}{4b_{\text{п1}}},$$

где k_{β} и k'_{β} – коэффициенты, учитывающие укорочение шага, определяют
из графика, изображенного на рис. 14, при этом $\beta = y_1 / \tau$.

Значение h_1 , мм, определяется как

$$h_1 = h_{z1} - h_{\text{ш1}} - h_{\text{к1}} - h'_1.$$

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния обмотки
статора

$$\lambda_{\text{д}} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot (q_1 k_{\text{об1}})^2 \cdot k_{\text{рт1}} \cdot k_{\text{ш1}} \cdot k_{\text{д1}}}{\delta \cdot k_{\delta}},$$

где $k_{\text{ш1}} = 1 - \frac{0,033b_{\text{ш1}}^2}{t_1 \delta}$.

Коэффициенты $k_{\text{рт1}}$ и $k_{\text{д1}}$ определяются из табл. 14 и 15 соответственно.

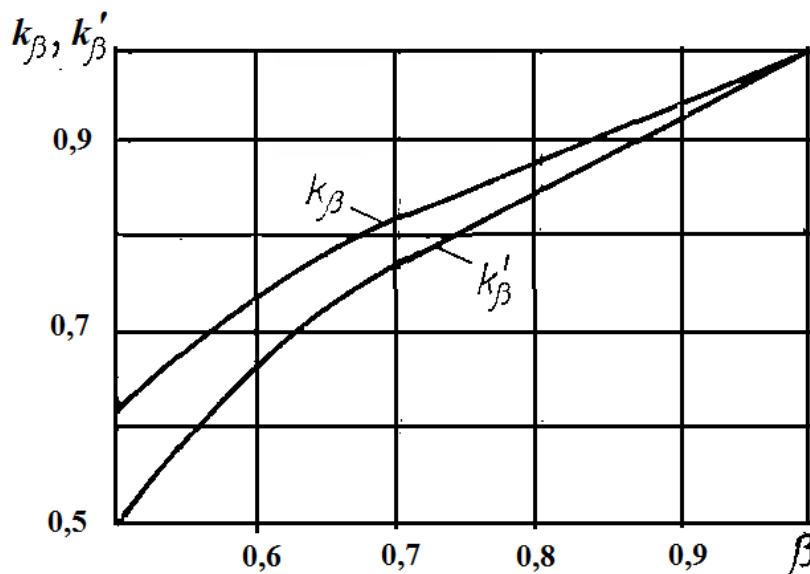


Рис. 15. К определению коэффициентов k_{β} и k'_{β}

Таблица 14

q_1	Значение коэффициента $k_{рт1}$ при Z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0,94	0,87	–	–	–	–	–
3	0,92	0,87	0,84	0,78	–	–	–
4	–	0,81	0,87	0,75	0,72	–	–
5	–	–	–	0,69	0,67	0,65	–
6	–	–	–	0,62	0,60	0,58	–
8	–	–	–	–	–	0,47	0,46

Таблица 15

q_1	Значение коэффициента $k_{д1}$	
	Двухслойная обмотка с укороченным шагом	Однослойная обмотка с диаметральным шагом
1,5	0,0450	–
2,0	0,0235	0,0285
2,5	0,0170	–
3	0,0111	0,0141
4	0,0062	0,0089
5	0,0043	0,0065
6	0,0030	0,0052
8	0,0021	–

Коэффициент воздушного зазора показывает, какое влияние зубчатости статора и ротора оказывают на магнитное сопротивление воздушного зазора:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2}.$$

Значение коэффициентов $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$ при полуоткрытых и полузакрытых пазах статора и полузакрытых пазах ротора:

$$k_{\delta 1} = 1 + \left[\frac{b_{ш1}}{t_1 - b_{ш1} + 5\delta t_1 / b_{ш1}} \right],$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \left[\frac{b_{ш2}}{t_2 - b_{ш2} + 5\delta t_2 / b_{ш2}} \right].$$

При открытых пазах статора и ротора:

$$k_{\delta 1} = 1 + \left[\frac{b_{п1}}{t_1 - b_{п1} + 5\delta t_1 / b_{п1}} \right],$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \left[\frac{b_{п2}}{t_2 - b_{п2} + 5\delta t_2 / b_{п2}} \right].$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_1}{l_1} (l_{л1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau).$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки статора

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}.$$

Индуктивное сопротивление

$$x_1 = \frac{1,58 f_1 l_1 \omega_1^2}{p q_1 10^8} \lambda_1.$$

5. РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Энергетические показатели асинхронного двигателя во многом зависят от воздушного зазора δ между статором и ротором.

Выбранную в п. 3 величину воздушного зазора δ , мм, можно уточнить по следующим выражениям:

– для двигателей мощностью до 20 кВт

при $2p = 2\delta \approx (0,3 + 1,5D)$;

при $2p \geq 4 \delta \approx (0,25 + D)$;

– для двигателей большой и средней мощности:

$$\delta \approx \frac{D}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2p} \right) \cdot 10^{-3}.$$

Полученную величину зазора округляют до 0,05 мм при $\delta < 0,5$ мм и до 0,1 мм при $\delta > 0,5$ мм. Например: 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6 мм и т.д.

Далее необходимо провести механический расчет вала проектируемого двигателя. Прогиб вала не должен быть больше 10% воздушного зазора.

6. РАСЧЕТ ОБМОТОК КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА

Короткозамкнутые роторы не имеют определенного числа фаз и числа полюсов. В электрическом отношении короткозамкнутая обмотка представляет собой многофазную обмотку, соединенную по схеме «звезда», и замкнутую накоротко. При этом число фаз обмотки короткозамкнутого ротора равно числу пазов $m_2 = Z_2$, а каждая фаза включает в себя один стержень и прилегающие к нему участки короткозамыкающих колец.

Обмоточный коэффициент такой обмотки равен единице, а условное число пазов на полюс и фазу

$$q_2 = \frac{Z_2}{2p_2 m_2} = \frac{1}{2p_2}.$$

При высоте оси вращения двигателя $h \leq 355$ мм пазы ротора заливают расплавленным алюминием. Поэтому размер и форма короткозамкнутой обмотки зависят от размеров и формы сердечника ротора (рис. 10).

Ток в стержне ротора в номинальном режиме, А:

$$I_{ст} = I_2 = \frac{1.1 \cdot \cos\varphi_1 \cdot I_{ном} \cdot 6 \cdot W_1 \cdot k_{об1}}{Z_2}.$$

Плотность тока в стержне ротора, А/мм²:

$$\Delta_2 = \frac{I_{ст}}{q_{ст}},$$

где $q_{ст}$ – сечение стержня, мм², равное площади паза ротора в штампе, $q_{ст} = S_{п2}$.

При этом плотность тока в стержне короткозамкнутой обмотки не должна превышать $\Delta_2 = 2,5 \dots 3,0$ А/мм².

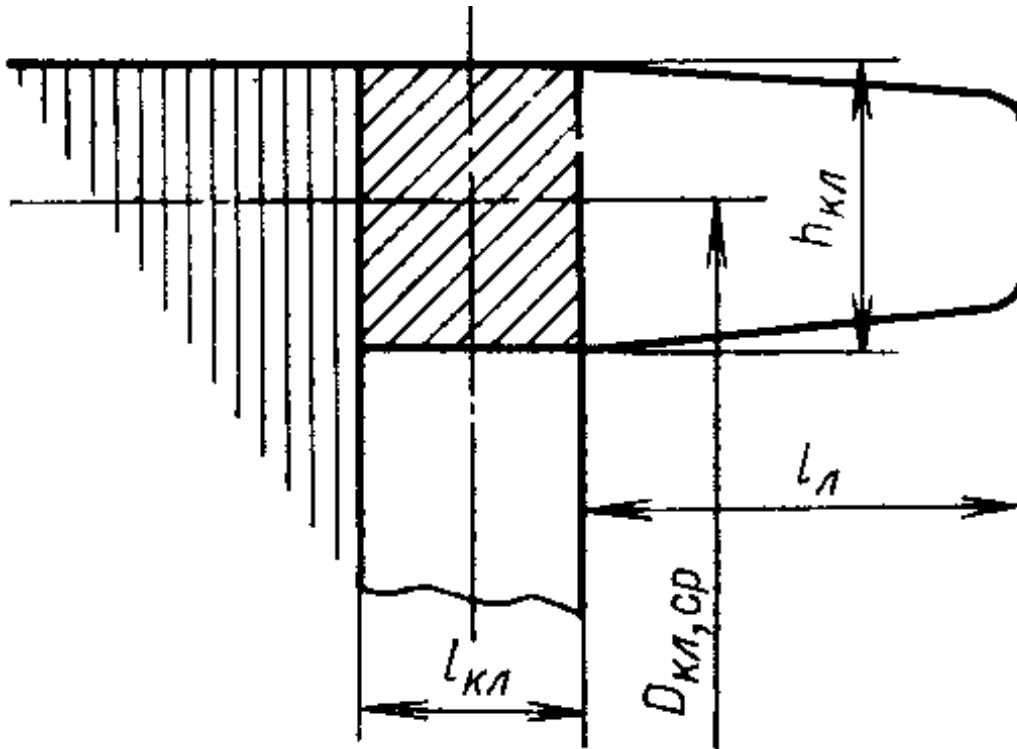


Рис. 16. Размеры короткозамыкающего кольца «белочьи клетки» ротора, изготовленной путем заливки алюминия

Размеры короткозамыкающего кольца (рис. 16) определяются следующими выражениями:

- поперечное сечение кольца, мм^2 :

$$q_{ккл} = \frac{(0,35 \dots 0,45)Z_2 \cdot q_{ст}}{2p};$$

- высота кольца, мм:

$$h_{ккл} = (1,1 \dots 1,25)h_{z2};$$

- длина кольца, мм:

$$l_{ккл} = \frac{q_{ккл}}{h_{ккл}};$$

- средний диаметр кольца, мм:

$$D_{ккл.ср} = D_2 - h_{ккл}.$$

Для овальных полузакрытых и закрытых пазов активное сопротивление стержня клетки ротора, Ом, приведенное к расчетной рабочей температуре, определяется следующим выражением:

$$r_{\text{ст}} = \rho_{\text{Al}} l_2 k_{\text{вт}} \cdot 10^3 / q_{\text{ст}},$$

где ρ_{Al} – удельное электрическое сопротивление литой алюминиевой клетки при рабочей температуре, Ом·м (табл. 13); $k_{\text{вт}}$ – коэффициент, учитывающий вытеснение тока в стержне, в рабочем режиме $k_{\text{вт}} = 1$.

Расчетная глубина проникновения тока в стержень

$$h_{\text{гп}} = h_{\text{ст}} / (1 + \varphi).$$

Для определения φ (рис. 17) рассчитаем коэффициент ξ , зависящий от температуры, по следующим выражениям:

- при рабочей температуре 115 °С

$$\xi_{115} = 0,064 h_{\text{ст}} \sqrt{s};$$

- при расчетной температуре 75 °С

$$\xi_{75} = 0,066 h_{\text{ст}} \sqrt{s}.$$

Ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока

$$b_{\text{гп}} = d'_{\text{п2}} - \frac{(d'_{\text{п2}} - d_{\text{п2}}) \cdot (h_{\text{гп}} - 0,5d'_{\text{п2}})}{h_2}.$$

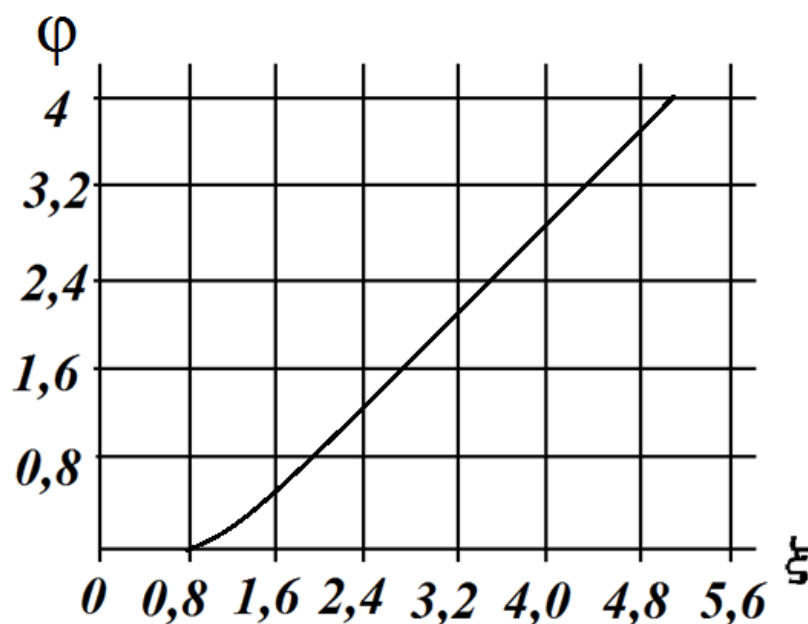


Рис. 17. Определение φ

Площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока, мм²:

$$q_{гп} = 0,4d'_{п2} + [0,5(d'_{п2} + b_{гп})(h_{гп} - 0,5d'_{п2})].$$

Активное сопротивление участка короткозамыкающего кольца между двумя соседними стержнями при расчетной рабочей температуре, Ом,

$$r_{кл} = \frac{2\pi \cdot D_{кл.ср} \cdot \rho_{Al} \cdot 10^3}{Z_2 \cdot q_{кл}}.$$

Активное сопротивление колец, приведенное к току стержня, Ом:

$$r''_{кл} = r_{кл} / k_{пр2}^2,$$

где $k_{пр2}^2$ – коэффициент приведения тока кольца к току стержня:

– при $Z_2/2p < 6$

$$k_{пр2} = 2 \sin(180^\circ p/Z_2);$$

– при $Z_2/2p \geq 6$

$$k_{пр2} \approx 2\pi p/Z_2.$$

Коэффициент скоса пазов ротора $k_{ск}$ определяется по центральному углу скоса $\alpha_{ск}$, рад (табл. 16):

$$\alpha_{ск} = \frac{\pi 2p \beta_{ск}}{Z_2},$$

где $\beta_{ск}$ – скос пазов в долях зубцового деления t_2 .

Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора

$$k_{пр1} = 4(m_1/Z_2)(W_1 k_{об}/k_{ск})^2.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора обусловлено пазовым, лобовым, дифференциальным рассеянием скоса пазов.

Таблица 16

$\alpha_{ск}$	$k_{ск}$	$\alpha_{ск}$	$k_{ск}$	$\alpha_{ск}$	$k_{ск}$	$\alpha_{ск}$	$k_{ск}$
0	1	0,5	0,991	1,0	0,969	1,5	0,909
0,1	1	0,6	0,986	1,1	0,951	1,6	0,897
0,2	0,999	0,7	0,980	1,2	0,941	1,7	0,884
0,3	0,998	0,8	0,974	1,3	0,932	1,8	0,870
0,4	0,995	0,9	0,967	1,4	0,921	1,9	0,956

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора:

- овального полузакрытого паза

$$\lambda_{п2} = C_{\lambda} + \left(h_{ш2}^2 / b_{ш2} \right);$$

- овального закрытого паза

$$\lambda_{п2} = C_{\lambda} + 0,3 + \left(1,12 h_{м2} \cdot 10^3 / I_2 \right),$$

$$C_{\lambda} = \psi \left[\frac{h_2 + 0,4 d_{п2}}{3 d'_{п2}} \left(1 - \frac{\pi d_{п2}'^2}{8 q_{ст}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш2}}{2 d'_{п2}} \right].$$

Для номинального режима $\psi = 1$.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{д2} = \frac{0,9 t_2 \left(Z_2 / 6p \right)^2 k_{д2}}{\delta k_{\delta}},$$

где $k_{д2}$ – коэффициент дифференциального рассеяния ротора определяют по рис. 18 в зависимости от q_2 ;

$$q_2 = Z_2 / 3 \cdot 2p.$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки ротора

$$\lambda_{\text{кл}} = \frac{2,3D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 l_2 k_{\text{пр}2}^2} \lg \frac{4,7D_{\text{кл.ср}}}{2h_{\text{кл}} + 2l_{\text{кл}}}.$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния скоса пазов ротора

$$\lambda_{\text{ск}} = t_2 \beta_{\text{ск}}^2 / 9,5 k_{\delta} k'_{\mu},$$

где k'_{μ} – коэффициент насыщения магнитной цепи принимают равным

$$k'_{\mu} = 1,2 \dots 1,4.$$

Коэффициент магнитной проницаемости рассеяния обмотки ротора

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{п}2} + \lambda_{\text{д}2} + \lambda_{\text{кл}} + \lambda_{\text{ск}}.$$

Индуктивное сопротивление

$$x_2 = 7,9 f_1 l_2 \lambda_2 \cdot 10^{-9}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом:

$$x'_2 = k_{\text{пр}1} x_2.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в относительных единицах

$$x'_{2*} = x'_2 (I_{1\text{ном}} / U_{1\text{ном}}).$$

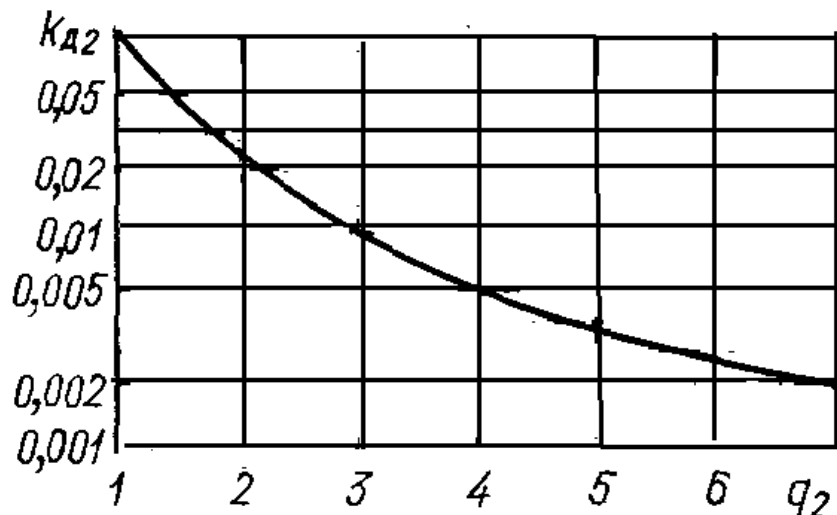


Рис. 18. К определению $k_{д2}$

Активное сопротивление для бутылочных закрытых пазов в верхней части паза

$$r_{\text{ст.в}} = \rho_{\text{Al}} l_2 \cdot 10^3 / q_{\text{ст.в}}.$$

Для нижней части стержня рассчитывают только при $\xi > 1$:

$$r_{\text{ст.н}} = \rho_{\text{Al}} l_2 k_{\text{вт.н}} \cdot 10^3 / q_{\text{ст.н}}.$$

При номинальном режиме $k_{\text{вт.н}} = 1$.

Расчетная глубина проникновения тока в нижней части стержня

$$h_{\text{гп.н}} = h_{\text{гп}} - (h'_2 + 0,5d'_{\text{п2}}).$$

Активное сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня определяют как

$$r''_{\text{кл}} = r_{\text{кл}} / k_{\text{пр2}}^2.$$

Активное сопротивление верхней части клетки

$$r'_{\text{в}} = k_{\text{пр1}} r_{\text{ст.в}}.$$

Активное сопротивление нижней части клетки

$$r'_{\text{н}} = k_{\text{пр1}} r_{\text{ст.н}}.$$

Способ крепления сердечников ротора зависит от диаметра ротора и высоты оси вращения машины. При высоте оси вращения $h \leq 250$ мм применяют горячую посадку сердечников, при $D_2 < 990$ мм сердечники роторов асинхронных двигателей выполняют с непосредственной посадкой на вал без промежуточной втулки, при $D_2 > 900$ мм сердечник набирают из отдельных сегментов и крепят на втулке ротора или на продольных ребрах.

Различают аксиальную и радиальную систему вентиляции ЭМ. В первом случае движение охлаждающего воздуха происходит вдоль охлаждаемых поверхностей в аксиальном направлении, а во втором – в радиальном направлении.

В АД при $h = 250$ мм аксиальные каналы диаметром $d_{\text{к2}} = 15...30$ мм располагают в одном ряду, по десять каналов $m_{\text{к2}} = 10$. В двигателях с высотой оси вращения $h = 280...355$ мм количество каналов 12 в одном ряду, диаметр $d_{\text{к2}} = 20...30$ мм. В двигателях с $h > 355$ мм число каналов уменьшают до 9, а диаметр увеличивают до $55...100$ мм, большие значения $d_{\text{к2}}$ относятся к двига-

телям с большим числом $2p$. Аксиальные каналы могут быть расположены в одном ряду или при больших диаметрах ротора в двух рядах.

Нагрев машины при аксиальной вентиляции в аксиальном направлении неравномерен, так как воздух при движении вдоль охлаждаемых частей машины подогревается, поэтому аксиальная вентиляция применяется обычно при активной длине машины до 200...250 мм.

При длине машины, превышающей 250...300 мм, применяют радиальные каналы в сердечнике ротора и статора. При этом в роторе необходимо предусмотреть и аксиальные каналы для подхода охлаждающего воздуха к радиальным каналам.

Наличие каналов, их диаметр и расположение оказывают влияние на магнитное напряжение ярма ротора и должны быть учтены при расчете магнитной цепи.

При непосредственной посадке на вал внутренний диаметр сердечника ротора D_j равен диаметру вала D_B и может быть определен по формуле

$$D_B \approx k_B D_a.$$

Значения коэффициента k_B в зависимости от числа полюсов и высоты оси вращения представлены в табл. 17.

Таблица 17

h , мм	71...250	280...355	
$2p$	2...8	2	4...12
k_B	0,23	0,22	0,23

7. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи АД позволяет определить МДС и намагничивающий ток статора. Так как магнитная система двигателя представляет собой симметричную магнитную цепь, расчет можно проводить для участка с одной парой полюсов.

Для АД в режиме холостого хода характерно относительно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора, что приводит к уплощению кривой магнитного поля в воздушном зазоре (рис. 19). Поэтому расчет проводят именно для этого режима.

$$B_{\text{расч}} = B_{\text{max}} \cos \psi \approx 0,82 B_{\text{max}}.$$

По основной кривой намагничивания и величине $B_{\text{расч}}$ определяют $H_{\text{расч}}$ и затем результат увеличивают в $k = 1/0,82$ раз, приводя таким образом напряженность к амплитудному значению индукции. При определении магнитных напряжений участков магнитной цепи с нелинейными магнитными характеристиками влияние уплощения учитывается специальными кривыми намагничивания для зубцов и ярм асинхронных двигателей, построенными по основной кривой намагничивания с учетом указанных зависимостей. При этом принимают $\alpha_{\delta} = 2/\pi$ и $k_{\text{в}} = 1,11$.

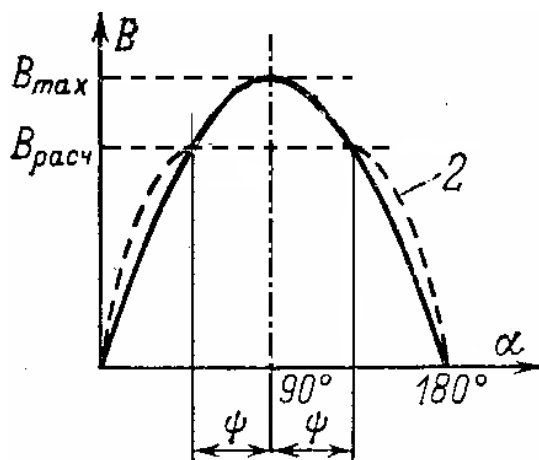


Рис. 19. Кривые индукции в воздушном зазоре асинхронной машины:

1 – синусоида; 2 – уплощенная кривая

Расчет магнитной цепи проводится в следующей последовательности.

1. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_{\delta} = 0,8B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^3.$$

2. Магнитная индукция в зубце статора

– для трапецеидальных полузакрытых пазов статора

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{k_{c1} \cdot b_{z1}}.$$

С учетом принятой марки электротехнической стали напряженность H_{z1} определяют по таблицам намагничивания для зубцов (табл. 18).

Таблица 18

Таблица намагничивания для зубцов АД. Сталь 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	225	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	876	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2150	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Таблица намагничивания для зубцов АД. Сталь 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									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	257	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	517	569	570	582
1,2	583	602	613	626	638	651	663	677	895	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4360	4500	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2,0	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10200
2,1	10600	11000	11500	12100	12600	13000	13500	14100	14700	15400
2,2	15900	16500	17300	17800	18500	1910	19600	20300	21100	22000
2,3	23100	24300	25500	26800	28100	29500	30900	32400	33900	36400

Коэффициент, учитывающий ответвление части магнитного потока в паз:

$$k_{п2} = \frac{t_{2(\frac{1}{3})}}{k_{c2} \cdot b_{z2}}$$

где

$$t_{2(1/3)} = \pi(D_2 - \frac{4}{3} h_{z2})Z_2.$$

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора при овальных пазах, А:

$$F_{z2} = H_{z2}(h_{z2} - 0,4d_{п2})10^{-3}.$$

Для бутылочных закрытых пазов ротора магнитная индукция в среднем сечении зубца верхней части паза

$$B_{z2B} = B_{\delta} t_2 / k_{c2} b_{z2B},$$

где

$$b_{z2B} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{M2} - h'_2)}{Z_2} - d'_{п2}.$$

Магнитное напряжение верхней части зубца, А:

$$F_{z2B} = H_{z2} L_{z2B} 10^{-3},$$

$$L_{z2B} = h'_2 + h_{m2}.$$

Магнитная индукция в нижней части бутылочного паза

$$B_{z2B} = B_{\delta} t_2 / k_{c2} b_{z2H},$$

$$b_{z2H} = (\pi / Z_2) (D_2 - 2h_{m2} - 2h'_2 - d_{п2}) - d_{п2}.$$

Магнитное напряжение нижней части зубца, А

$$F_{z2H} = H_{z2} L_{z2H} 10^{-3},$$

$$L_{z2H} = h_2 + 0,5(d_{п2} + d'_{п2}).$$

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора при бутылочном пазе, А:

$$F_{z2} = F_{z2B} + F_{z2H}.$$

При этом коэффициент

$$k_{п2(1/2)} = \frac{t_{2H(1/2)}}{k_{c2} \cdot b_{z2H}},$$

где $t_{2H(1/2)}$ – шаг по нижней части паза на высоте $1/2$ от нижней части зубца, мм:

$$t_{2H(1/2)} = \pi / Z_2 (D_2 - 2h_{z2} + h_2).$$

При прямоугольных закрытых пазах магнитная индукция в наиболее узком месте зубца, Тл:

$$B_{z2(1/3)} = B_{\delta} t_2 / b_{z2(1/3)} k_{c2},$$

где $b_{z2(1/3)}$ – ширина зубца в расчетном сечении, мм:

$$b_{z2(1/3)} = (\pi / Z_2) \left(D_2 - \frac{4}{3} h_{z2} \right) - b_{п2}.$$

Коэффициент магнитного насыщения зубцов

$$k_{\mu z} = \frac{(F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2})}{F_{\delta}}.$$

Магнитная индукция в спинке статора, Тл:

$$B_{c1} = \frac{0,5 \alpha_i \tau B_{\delta}}{k_{c1} h_{c1}}.$$

Напряженность H_{c1} определяют по таблицам намагничивания для спинки (табл. 19) в зависимости от принятой марки электротехнической стали.

Магнитное напряжение спинки статора, А

$$F_{c1} = H_{c1} L_{c1} 10^{-3}.$$

Таблица намагничивания для спинки АД. Сталь 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	285	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	530	654	678	702	726
1,6	750	788	826	854	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2100	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6330	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица намагничивания для спинки АД. Сталь 2312

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4300	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2,0	104000	11100	11800	12500	13300	14100	14900	15800	16700	17600

Магнитная индукция в спинке ротора, Тл:

$$B_{c2} = \frac{0,5\alpha_i \tau B_\delta}{k_{c2} h_{c2}}.$$

Магнитное напряжение спинки ротора, А:

$$F_{c2} = H_{c2} L_{c2} 10^{-3},$$

где L_{c2} – длина средней силовой линии в спинке ротора, мм:

$$L_{c2} = \left(\left(\frac{\pi}{2p} \right) (D_2 - 2h_{z2} - h_{c2}) + h_{c2} \right).$$

При наличии в сердечнике ротора аксиальных вентиляционных каналов диаметром d_{k2} длину средней силовой линии принимают равной, мм:

$$L'_{c2} = L_{c2} + 1,3d_{k2}.$$

Намагничивающий ток.

Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя

$$k_\mu = \Sigma F / 2F_\delta,$$

где ΣF – МДС на пару полюсов, А.

Намагничивающий ток, А

$$I_\mu = \frac{p \Sigma F}{0,9 m_1 W_1 k_{об1}}.$$

В процентах от номинального тока

$$I_{\mu\%} = I_\mu \cdot \frac{100}{I_{1ном}}.$$

Коэффициент магнитного рассеяния обмотки статора

$$\sigma_\mu = x_1 / x_m.$$

где x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора; x_m – главное индуктивное сопротивление обмотки статора, соответствующее основной гармонике, Ом:

$$x_m = \frac{k_E U_1}{I_\mu}.$$

8. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД АД

При работе асинхронного двигателя происходит преобразование электрической энергии в механическую. Это преобразование сопровождается магнитными потерями энергии в пакетах магнитопроводов статора и ротора, электрическими потерями в обмотках статора и ротора, механическими и добавочными потерями. Отсюда следует, что полезная мощность на выходе двигателя P_2 всегда меньше потребляемой мощности P_1 на величину потерь ΣP .

Магнитные потери в АД рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = sf_1$, в режимах, близких к номинальному, очень мала, и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны.

Основные магнитные потери в спинке статора, Вт:

$$P_{mc1} = k_{MT} P_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta B_{c1}^2 G_{c1},$$

Основные потери в зубцовом слое статора, Вт:

$$P_{mz1} = k_{MT} P_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta B_{z1}^2 G_{z1},$$

где $k_{MT} = 1,7$ – технологический коэффициент, учитывающий увеличение магнитных потерь из-за наличия в сердечнике статора дефектов, возникающих при штамповке, сборке и т.п.; β – показатель степени, зависящий от марки стали (см. табл. 21); $P_{1,0/50}$ – удельные магнитные потери, происходящие в 1 кг стали при перемагничивании с частотой 50 Гц в магнитном поле с индукцией 1 Тл.

Таблица 20

Марка стали	β	$P_{1,0/50}$, Вт/кг
2013	1,5	2,5
2211	1,5	2,6
2312	1,4	1,75
2411	1,3	1,6

Магнитные индукции в спинке статора B_{c1} и в зубцовом слое B_{z1} принимаются из расчета магнитной цепи.

Расчетные массы стали, кг, спинки статора и зубцового слоя соответственно:

$$G_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} l_1 k_{c1} h_{c1} \pi (D_a - h_{c1}),$$

$$G_{z1} = 7,8 \cdot 10^{-6} l_i k_{c1} (h_{z1} \pi (D + h_{z1}) - S_{п1} Z_1).$$

При частоте переменного тока $f_1 = 50$ Гц магнитные потери в спинке и в зубцовом слое статора можно рассчитать по следующим выражениям:

$$P_{mc1} = k_{MT} P_{1,0/50} B_{c1}^2 G_{c1},$$

$$P_{mz1} = k_{MT} P_{1,0/50} B_{z1}^2 G_{z1}.$$

Тогда основные магнитные потери в АД

$$P_M = P_{mc1} + P_{mz1}.$$

Основные электрические потери вызваны нагревом обмоток статора и ротора проходящими по ним токами:

$$P_{1э} = m_1 I_1^2 r_1; P_{2э} = m_2 I_2^2 r_2,$$

где r_1 и r_2 – сопротивления обмоток фаз статора и ротора; m – число фаз.

Основные механические потери $P_{мех}$ – это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию. Величина этих потерь пропорциональна квадрату частоты вращения ротора $P_{мех} \equiv n^2$ и зависит от степени защиты и способа охлаждения двигателя.

Для двигателей со степенью защиты IP44 и способа охлаждения IC0141:

$$P_{\text{мех}} = k_{\text{T}}(n_1 \cdot 10^{-3})^2(D_a \cdot 10^{-2})^2,$$

$$k_{\text{T}} = 1,3(1 - D_a \cdot 10^{-3}) \text{ при } 2p = 2; k_{\text{T}} = 1 \text{ при } 2p > 2.$$

Механические потери при степени защиты IP23 и способе охлаждения двигателя IC01 без радиальных вентиляционных каналов с вентиляционными лопатками на короткозамыкающих определяются из выражения

$$P_{\text{мех}} = k_{\text{T}}(n_1 \cdot 10^{-3})^2(D \cdot 10^{-3})^4 \cdot 10^3.$$

Здесь $k_{\text{T}} = 6$ для двигателей с $2p = 2$ при $D > 250$ мм и при $2p > 2, D \leq 250$, для двигателей с $2p = 2$ и $D \leq 250$ мм $k_{\text{T}} = 5$, при $2p > 2$ и $D > 250$ мм $k_{\text{T}} = 7$.

Добавочные потери составляют порядка 0,5% от подводимой к двигателю мощности P_1 , они включают в себя все виды потерь, вызванных высшими гармониками МДС, потоком рассеяния, пульсацией магнитной индукции в зубцах и другими причинами.

$$P_{\text{доб}} = 0,005P_1 \cdot 10^3/\eta'_{\text{ном}},$$

$\eta'_{\text{ном}}$ – предварительное значение КПД двигателя (рис. 4).

КПД АД – это отношение полезной механической мощности к мощности, потребляемой из сети:

$$\eta = P_2/P_1,$$

где P_1 – мощность электрической энергии, потребляемой двигателем из сети.

$$P_1 = \sqrt{3}U I \cos \varphi_1, \text{ Вт},$$

$P_2 = \omega M$, Вт, – полезная механическая мощность АД, или мощность, развиваемая АД на валу.

9. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ

При работе АД его нагрузка может меняться от холостого хода до номинальной. С изменением нагрузки будут меняться и основные параметры АД – потребляемые ток и мощность, частота вращения, КПД, коэффициент мощности, скольжение, момент.

Зависимости частоты вращения ротора n , тока статора I_1 , момента на валу M , КПД η и $\cos\varphi$ от мощности, развиваемой двигателем P_2 при $U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$, называются *рабочими характеристиками* АД (рис. 20).

Эти зависимости определяют экспериментально или аналитически по схеме замещения или круговой диаграмме.

В основу аналитического метода расчета рабочих характеристик двигателя положена схема замещения с вынесенным намагничивающим контуром (рис. 21).

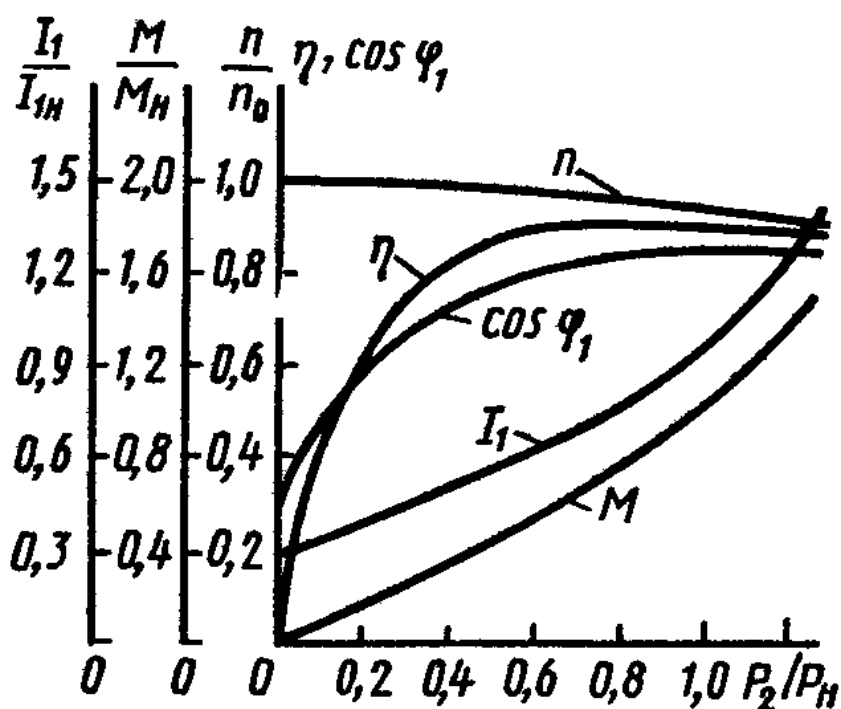


Рис. 20. Рабочие характеристики АД

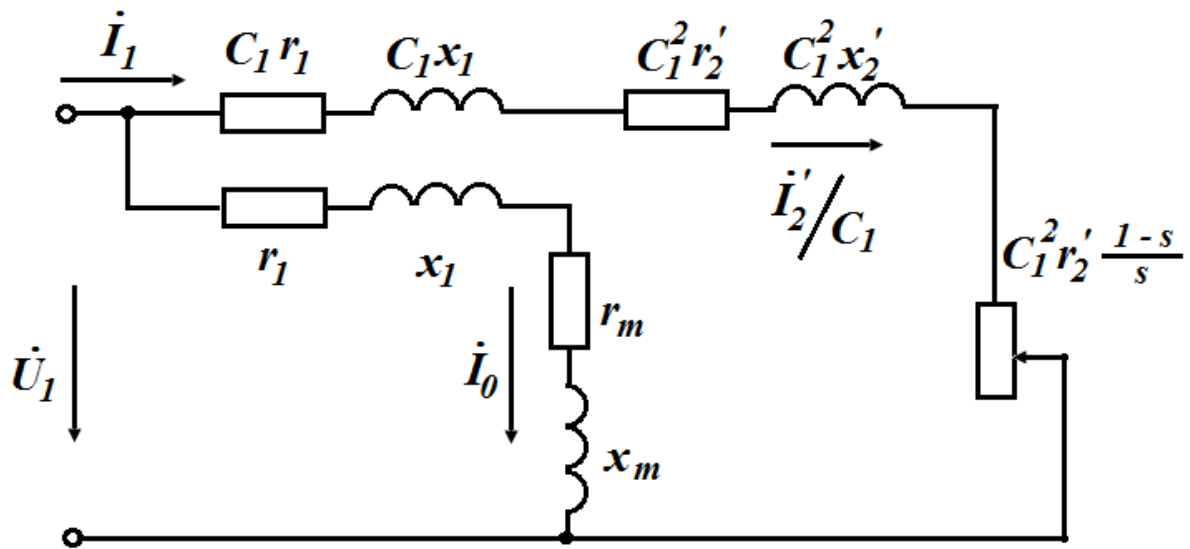


Рис. 21. Схема замещения АД

Скольжение при различных нагрузках двигателя определяют по формуле

$$s = \frac{[A - \sqrt{A^2 - c_1^2 r_2' B}]}{B},$$

где

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m},$$

$$A = \frac{m_1 \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{(2P_2') - r_1},$$

$$B = 2A + R',$$

$$R' = r_2' \left\{ \left[\frac{r_1}{r_2'} \cdot \left(1 + \frac{x_2'}{x_m} \right) \right]^2 + \left[\frac{x_1}{r_2'} \cdot \left(1 + \frac{x_2'}{x_m} \right) + \frac{x_2'}{r_2'} \right]^2 \right\}.$$

Полная механическая мощность

$$P_2' = P_2 + P_{\text{доб}} + P_{\text{мех}}.$$

Эквивалентные сопротивления рабочей цепи схемы замещения:

– активное сопротивление

$$r_{\text{экв}} = c_1 \cdot r_1 + \frac{c_1^2 \cdot r_2'}{s}.$$

– индуктивное сопротивление

$$x_{\text{экв}} = c_1 \cdot x_1 + c_1^2 x_2'.$$

Сопротивления $r_1, x_1, r_2', x_2', x_{\text{мин}}$ были рассчитаны ранее в п. 4 – 7.

Полное сопротивление

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{r_{\text{ЭКВ}}^2 + x_{\text{ЭКВ}}^2}.$$

Коэффициент мощности в рабочей цепи схемы размещения

$$\cos\varphi'_2 = \frac{r_{\text{ЭКВ}}}{Z_{\text{ЭКВ}}}.$$

Ток в рабочей цепи схемы замещения:

Полный ток, А:

$$I_2'' = \frac{U_{\text{НОМ}}}{Z_{\text{ЭКВ}}}.$$

Активная составляющая тока, А:

$$I_{2a}'' = I_2'' \cdot \cos\varphi'_2.$$

Реактивная составляющая тока, А:

$$I_{2p}'' = I_2'' \cdot \sin\varphi'_2.$$

Ток статора:

Активная составляющая тока, А:

$$I_{1a} = I_{0a} + I_{2a}''.$$

Реактивная составляющая тока, А:

$$I_{0p} \approx I_{\mu},$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I_{2p}''.$$

Полный ток, А:

$$I_{1\text{НОМ}} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi_{\text{НОМ}} = \frac{I_{1a}}{I_{1\text{НОМ}}}.$$

Потребляемая двигателем мощность, Вт:

$$P_{1\text{НОМ}} = m_1 U_{1\text{НОМ}} I_{1a}.$$

Электромагнитная мощность, Вт:

$$P_{\text{ЭМ}} = P_1 - P_{\text{М}} - P_{\text{Э}}.$$

Частота вращения ротора, об/мин:

$$n_{\text{НОМ}} = n_1(1 - s_{\text{НОМ}}).$$

Электромагнитный момент, Н · м:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{9,55P_{\text{ЭМ}} \cdot 10^3}{n_{\text{НОМ}}}.$$

КПД двигателя

$$\eta = \frac{P_{\text{НОМ}}}{P_{1\text{НОМ}}}.$$

Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} \approx \frac{C_1 \cdot r_2'}{(x_1 + c_1 \cdot x_2')}.$$

Перегрузочная способность двигателя

$$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{НОМ}}} = \frac{\left(\frac{s_{\text{НОМ}}}{s_{\text{кр}}}\right) + \left(\frac{s_{\text{кр}}}{s_{\text{НОМ}}}\right) + R_{\text{кр}}}{2 + R_{\text{кр}}}.$$

Сопротивление, соответствующее критическому скольжению, Ом:

$$R_{\text{кр}} = \frac{2r_1 \cdot s_{\text{кр}}}{c_1 \cdot r_2^*}.$$

10. РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ

Основными характеристиками пуска являются величина пускового момента и величина пускового тока.

При пуске АД должен развивать пусковой момент, превышающий момент сопротивления нагрузки, иначе под нагрузкой двигатель может не запуститься. Пусковые свойства АД определяются конструкцией его ротора и характеризуются значениями пускового тока и пускового момента.

В момент пуска, когда скольжение $s = 1$, пусковой ток достигает максимального значения и может превысить номинальный в 5 – 7 раз, что опасно для двигателя, так как большой ток вызывает нежелательный перегрев изоляции обмоток, кроме этого, большой пусковой ток может отрицательно сказаться на работе сети, вызвав снижение напряжения.

Ограничение пускового тока до значения, не опасного для нормального режима работы сети, механической и термической прочности основных элементов двигателя, осуществляют путем искусственного увеличения активного сопротивления фазы обмотки ротора.

Активное сопротивление короткого замыкания при $s = 1$ с учетом явления вытеснения тока

$$r'_{к.п} = c_1 \cdot r_1 + c_1^2 \cdot r'_{2п},$$

где $r'_{2п}$ – активное сопротивление обмотки ротора, Ом, при пуске двигателя

$$r'_{2п} = k_{пр1}(k_{вт}r_{ст} + r''_{кл}).$$

Для учета влияния магнитного насыщения зубцового слоя индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора представляют состоящими из переменных и постоянных составляющих.

Переменные составляющие индуктивных сопротивлений определяются коэффициентами магнитной проводимости рассеяния, которые зависят от насыщения: коэффициентами дифференциального рассеяния статора и рото-

ра и частично коэффициентами пазового рассеяния, связанными с рассеяниями клиновой части и шлица пазов статора и ротора, мостиков закрытых пазов ротора.

Постоянные составляющие индуктивных сопротивлений определяются коэффициентами магнитной проводимости, которые не зависят от насыщения: коэффициентами лобового рассеяния обмоток статора, коэффициентами рассеяния короткозамыкающих колец и рассеяния скоса пазов ротора, связанными с рассеянием части паза, занятого собственно обмоткой или стержнем.

Переменная составляющая коэффициента пазового рассеяния статора, зависящая от насыщения:

- для трапецеидального полузакрытого паза

$$\lambda_{п1пер} = \left(\frac{3h_k}{b'_п + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш1}} \right) k'_\beta;$$

- для прямоугольного полуоткрытого паза

$$\lambda_{п1пер} = \left(\frac{3h_{к1}}{b_{п1} + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} \right) k'_\beta;$$

- для прямоугольного открытого паза

$$\lambda_{п1пер} = \frac{h_{к1} + h_{ш1}}{b_{п1}} k'_\beta.$$

Переменная составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора

$$\lambda_{1пер} = \lambda_{п1пер} + \lambda_{д1},$$

где $\lambda_{д1}$ – коэффициент проводимости дифференциального рассеяния

Переменная составляющая коэффициента пазового рассеяния ротора, зависящая от насыщения:

- для овального полузакрытого паза

$$\lambda_{п2пер} = h_{ш2}/b_{ш2};$$

- для овального закрытого паза

$$\lambda_{п2пер} = \frac{1,12 \cdot 10^3 h_{M2}}{I_2};$$

- для бутылочного закрытого паза

$$\lambda_{\text{п2в.пер}} = \frac{1,12 \cdot 10^3 h_{M2}}{I_2}$$

Переменная составляющая коэффициента проводимости ротора, Ом:

$$\lambda_{2\text{пер}} = \lambda_{\text{п2пер}} + \lambda_{\text{д2}}$$

Переменная составляющая индуктивного сопротивления короткого замыкания, Ом:

– пазы короткозамкнутого ротора овалыные полузакрытые или закрытые:

$$x_{\text{пер}} = \left(\frac{c_1 \cdot x_1 \cdot \lambda_{1\text{пер}}}{\lambda_1} \right) + \left(\frac{c_1^2 \cdot x_2' \cdot \lambda_{2\text{пер}}}{\lambda_2} \right);$$

– для бутылочных полузакрытых пазов

$$x_{\text{пер}} = \left(\frac{c_1 \cdot x_1 \cdot \lambda_{1\text{пер}}}{\lambda_1} \right) + \left(\frac{c_1^2 \cdot x_0' \cdot \lambda_{2\text{пер}}}{\lambda_{20}} \right).$$

Постоянная составляющая индуктивного сопротивления рассеяния, не зависящая от насыщения, Ом:

– пазы короткозамкнутого ротора овалыные полузакрытые или закрытые

$$x_{\text{пост}} = c_1 \cdot x_1 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_{1\text{пер}}}{\lambda_1} \right) + c_1^2 \cdot x_{2\text{п}}' \left(\frac{\lambda_2' - \lambda_{2\text{пер}}}{\lambda_2'} \right);$$

– для бутылочных полузакрытых пазов

$$x_{\text{пост}} = c_1 \cdot x_1 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_{1\text{пер}}}{\lambda_1} \right) + c_1^2 \cdot x_0' \left(\frac{\lambda_2' - \lambda_{2\text{пер}}}{\lambda_2'} \right) + c_1^2 \cdot x_{\text{н}}' \left(\frac{S_{\text{п2н}}}{S_{\text{п2н}} + S_{\text{п2в}}} \right)^2$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания для пускового режима, Ом:

$$x'_{\text{к.п}} \approx x_{\text{пост}} + k_x \cdot x_{\text{пер}}$$

При полузакрытых пазах ротора $k_x = 0,0825$, а при закрытых – $k_x = 0,25$.

Начальный пусковой ток, А:

$$I_{1\text{п}} \approx \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{r_{\text{к.п}}'^2 + x_{\text{к.п}}'^2}}$$

Начальный пусковой момент, Н · м

$$M_{\Pi} = \frac{p \cdot m_1 I_{1\Pi}^2 r'_{2\Pi}}{2 \cdot \pi \cdot f_1}.$$

Кратность пускового момента определяют как отношение $M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}}$:

– при $h \leq 132$ мм $M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}} = 2 \dots 2,2$;

– при $h = 160 \dots 355$ мм $M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}} = 1,2 \dots 1,4$ кратность пускового тока

$I_{\Pi}/I_{\text{НОМ}} = 4,5 \dots 7,5$;

– при этом большие значения соответствуют двигателям большей мощности.

11. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ АД

Во время работы двигателя происходит нагрев активных частей машины. Повышенная температура оказывает негативное влияние на изоляцию обмоток, изоляция теряет свою электрическую и механическую прочность, что может привести к межвитковому замыканию, дополнительным потерям мощности и вывести двигатель из строя. Поэтому необходимо особое внимание уделить системе охлаждения машины.

Тепловой расчет необходим для определения превышения температуры различных частей машины. Результаты расчета показывают правильность выбора электромагнитных нагрузок и целесообразность применения электроизоляционных материалов выбранного класса нагревостойкости.

Способ охлаждения зависит от вида исполнения машины и ее мощности. Чем больше мощность машины, тем более интенсивное охлаждение ей необходимо.

Электрические машины малой и средней мощности обычно выполняют с самовентиляцией. В этом случае охлаждение нагретых частей осуществляется вентилятором, который насаживают на вал ротора. В некоторых машинах вентиляторами являются вентиляционные лопасти или другие приспособления, пристраиваемые к торцовой части сердечника ротора.

АД общего назначения предназначены для работы в продолжительном режиме, поэтому для них проводят расчет установившегося теплового режима.

Максимальные температуры всех частей машины не должны превышать нормированных значений. Для этого необходим правильный выбор электро-

магнитных нагрузок, при которых тепло, выделяемое в обмотках и магнитопроводе, успевает отводиться из машины системой ее охлаждения и не вызывает недопустимого нагрева машины.

Перепадом температур в металлах пренебрегают, так как они обладают высокой теплопроводностью, а большое значение уделяют перепаду температуры в изоляции и между охлаждаемой поверхностью и охлаждающей средой.

Перепад температуры в изоляции, °С:

$$\Delta\theta_{\text{из}} = \frac{Q\delta_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}S_{\text{из}}},$$

где $\delta_{\text{из}}$ – толщина изоляции; $S_{\text{из}}$ – площадь сечения изоляции; Q – количество теплоты, проходящей через изоляцию в единицу времени; $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности изоляционных слоев.

Превышение температуры нагретой поверхности относительно температуры охлаждающего воздуха с учетом всех видов теплопередачи, °С:

$$\Delta\theta_{\text{пов}} = \frac{Q_{\text{пов}}}{\alpha_{\text{пов}}S_{\text{пов}}},$$

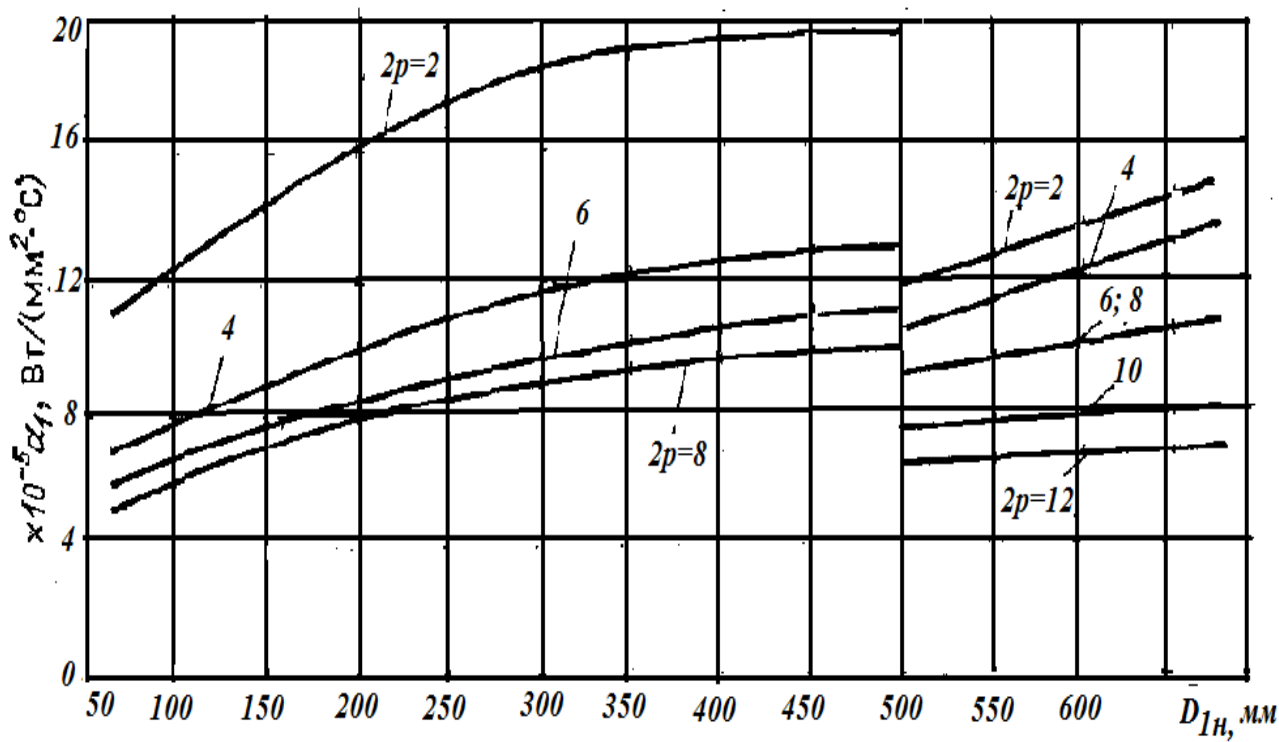
где $Q_{\text{пов}}$ – тепловой поток через поверхность охлаждения; $S_{\text{пов}}$ – площадь охлаждаемой поверхности; $\alpha_{\text{пов}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности.

Обмотка статора

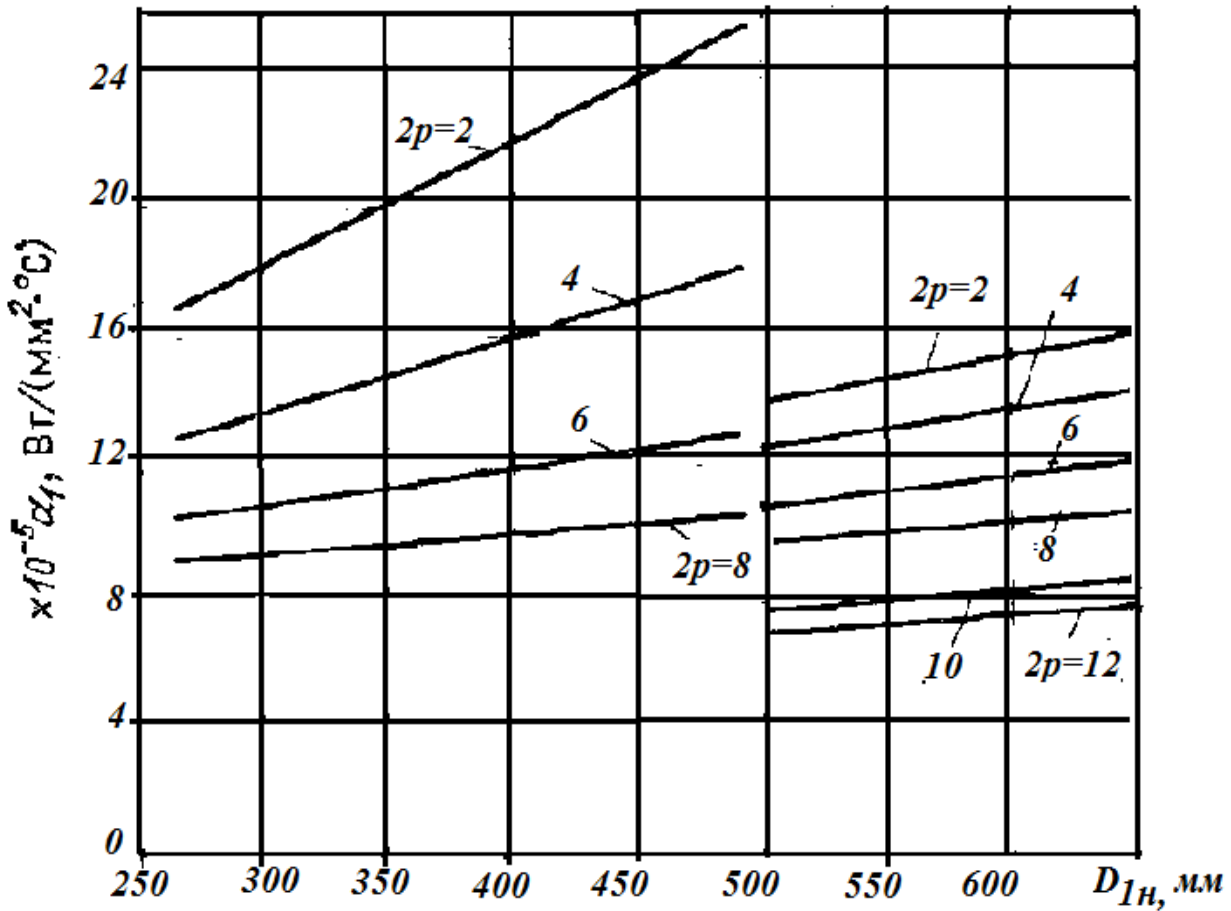
Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя, °С:

$$\Delta\theta_{\text{пов1}} = k(k_{\theta}P_{\text{э1}}(2l_1/l_{\text{ср1}}) + P_{\text{м1}})/(\pi D l_1 \alpha_1),$$

где D – внутренний диаметр сердечника статора, мм; α_1 – коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника статора, Вт/(мм² · °С), определяется по графикам, изображенным на рис. 22;



a)



б)

Рис. 22. Коэффициент теплоотдачи α_1 :
 а – степень защиты IP44; б – степень защиты IP23

Таблица 21

Исполнение по способу защиты	Значения k при числе полюсов $2p$					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,2	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,8	0,78	0,76	0,74	0,72

k – коэффициент, учитывающий долю потерь в сердечнике статора, передаваемых воздуху внутри двигателя (табл. 21); k_{θ} – коэффициент, определяемый отношением значений удельной электрической проводимости меди при расчетной рабочей температуре и при максимальной удельной температуре, имеющий в зависимости от класса нагревостойкости изоляции следующие значения (табл. 22):

Таблица 22

Класс нагревостойкости	B	F	H
Значение k_{θ}	1,15	1,07	1,145

$P_{\varepsilon 1}$ – электрические потери в обмотке статора, Вт; P_{m1} – магнитные потери в обмотке статора, Вт; l_{cp1} – средняя длина витка обмотки статора, мм.

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, °C:

$$\Delta\theta_{пз1} = \frac{k_{\theta} P_{\varepsilon 1} (2l_1 / l_{cp1})}{Z_1 \Pi_1 l_1} \left(\frac{C_{\Pi 1}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{b_{\Pi 1} + b'_{\Pi 1}}{16\lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right),$$

где Π_1 – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза статора, мм.

Для трапецеидального полузакрытого паза

$$\Pi_1 = 2h_{\Pi 1} + b'_{\Pi 1} + b_{\Pi 1}.$$

Для прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов

$$P_1 = 2(h_{п1} + b_{п1}),$$

где $C_{п1}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу статора, мм; $\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции обмотки в пазу с учетом воздушных прослоек для изоляции класса В и F; $\lambda_{\text{экв}} = 16 \cdot 10^{-5}$, Вт/(мм² · °С); $\lambda'_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции провода (рис. 23).

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя, °С:

$$\Delta\theta_{л1} = \frac{k \cdot k_{\theta} \cdot P_{э1} \cdot 2l_{л1} / l_{ср1}}{2 \cdot \pi \cdot D_1 l_{в1} x_1},$$

где $l_{л1}$ – средняя длина одной лобовой части катушки, мм; $l_{ср1}$ – средняя длина витка обмотки статора, мм; $l_{в1}$ – длина вылета лобовой части обмотки, мм.

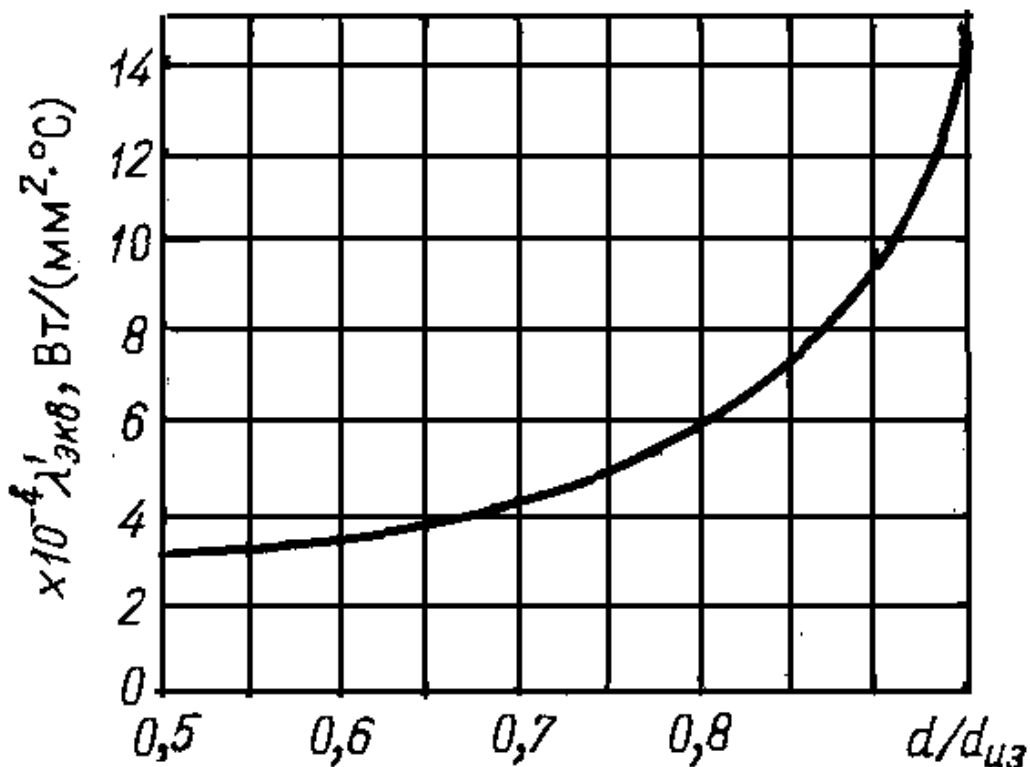


Рис. 23. Эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции провода

Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки статора, °С:

$$\Delta\theta_{\text{нэ.л1}} = \frac{k_{\theta} \cdot P_{\text{э}} \cdot 2l_{\text{л1}} / l_{\text{ср1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{л1}} \cdot l_{\text{л1}}} \cdot \left(\frac{C_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{h_{\text{п1}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right).$$

где $\Pi_{\text{л1}}$ – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки обмотки статора, мм.

Для трапецеидального полузакрытого паза

$$\Pi_{\text{л1}} \approx 2h_{\text{п1}} + b_{\text{п1}} + b'_{\text{п1}}.$$

Для прямоугольного полуоткрытого и открытого пазов

$$\Pi_{\text{л1}} \approx 2(h_{\text{п1}} + b_{\text{п1}}).$$

$C_{\text{л1}}$ – односторонняя толщина изоляции лобовой части, мм.

Для статоров с открытыми и полуоткрытыми пазами

$$\Delta\theta_{\text{нэ.л1}} = \frac{k_{\theta} \cdot P_{\text{э}} \cdot 2l_{\text{л1}} / l_{\text{ср1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{л1}} \cdot l_{\text{л1}}} \cdot \left(\frac{C_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} \right).$$

Для обмоток, не имеющих изоляции лобовых частей

$$\Delta\theta_{\text{нэ.л1}} = \frac{k_{\theta} \cdot P_{\text{э}} \cdot 2l_{\text{л1}} / l_{\text{ср1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{л1}} \cdot l_{\text{л1}}} \cdot \left(\frac{h_{\text{п1}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right).$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя, °С:

$$\Delta\theta'_1 = \frac{2l_1 \cdot (\Delta\theta_{\text{пов1}} + \Delta\theta_{\text{из1}})}{l_{\text{ср1}}} + \frac{2l_{\text{л1}} (\Delta\theta_{\text{л1}} + \Delta\theta_{\text{из1}})}{l_{\text{ср1}}}.$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\theta_{\text{в}} = \frac{\Sigma P_{\text{в}}}{S_{\text{дв}} \alpha_{\text{в}}}.$$

Условия поверхности охлаждения, мм²:

$$S_{\text{дв}} = (\pi D_{1\text{н}} + 8n_p h_p) \cdot (l_1 + 2l_{\text{в1}}).$$

Суммарные потери, отводимые в воздух внутри двигателя, Вт.

Для двигателей со степенью защиты IP23

$$\sum P_{\text{в}} = \sum P' - (1 - k) \cdot (P_{\text{э.п1}} + P_{\text{м}}).$$

Для двигателей со степенью защиты IP44

$$\sum P_{\text{в}} = \sum P' - (1 - k) \cdot (P_{\text{э.п1}} + P_{\text{м}}) - 0,9P_{\text{мех}};$$

$$\sum P' = \Sigma P - (k_{\theta} - 1)(P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}).$$

Электрические потери в лобовых и пазовых частях обмотки статора соответственно:

$$P_{\text{э.л1}} = k_{\theta} \cdot P_{\text{э1}} \cdot \frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}};$$

$$P_{\text{э.п1}} = k_{\theta} \cdot P_{\text{э1}} \cdot \frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}}.$$

Условная поверхность охлаждения двигателя со степенью защиты IP23

$$S_{\text{дв}} = \pi D_{1\text{н}}(l_1 + 2l_{\text{в1}}).$$

Для двигателей со степенью защиты IP44

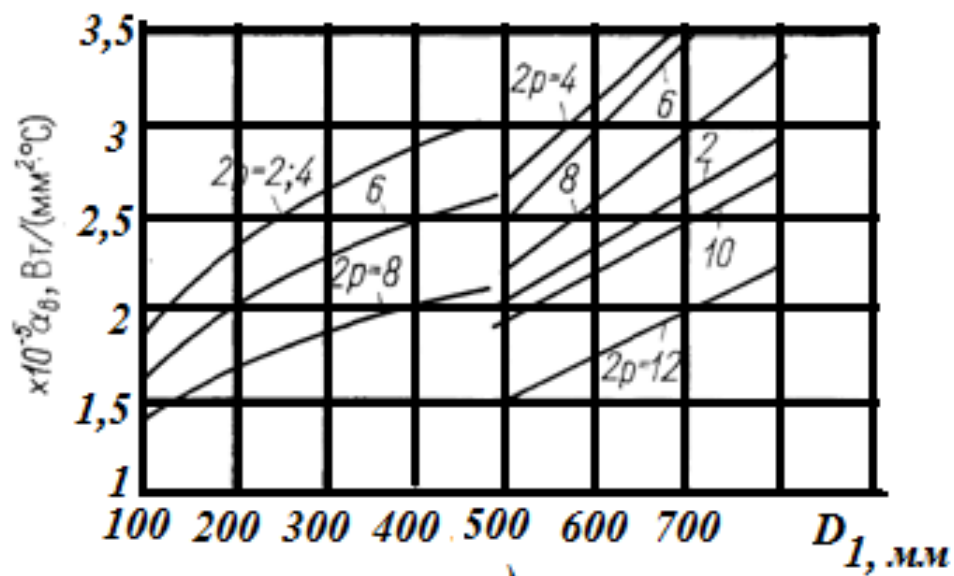
$$S_{\text{дв}} = (\pi D_{1\text{н}} + 8n_p h_p)(l_1 + 2l_{\text{в1}}),$$

где n_p и h_p – число охлаждающих ребер и их высота.

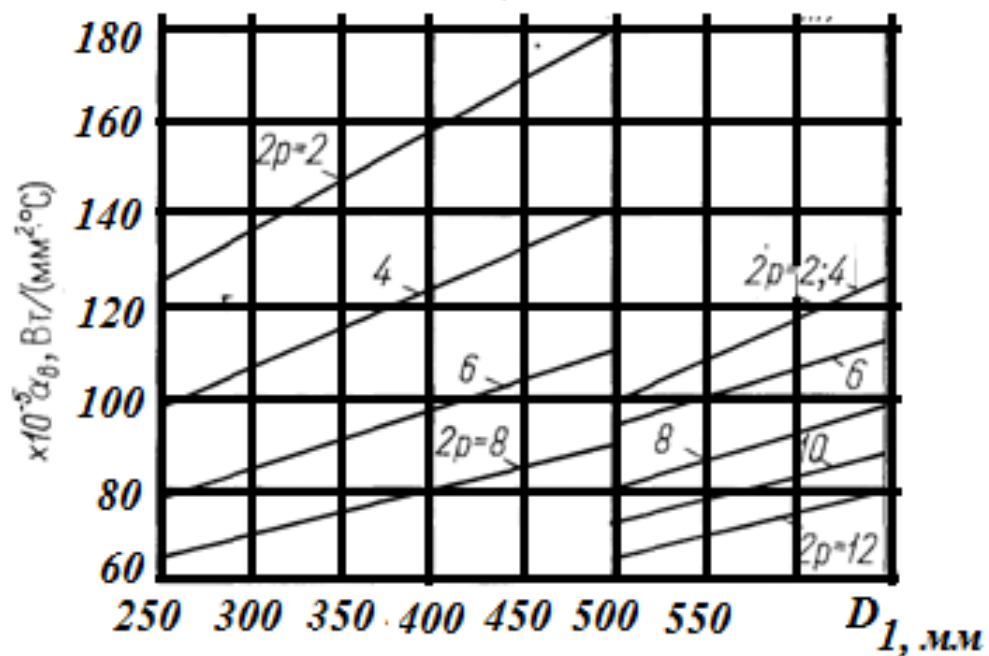
Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды, °С:

$$\Delta\theta_{\text{в}} = \frac{\sum P_{\text{в}}}{S_{\text{дв}} \cdot \alpha_{\text{в}}}.$$

Значение коэффициента подогрева воздуха, $\alpha_{\text{в}}$, Вт/(мм² · °С), определяется из графиков, изображенных на рис. 24.



а)



б)

Рис. 24. Коэффициент подогрева воздуха α_b ,
 а – степень защиты IP23; б – степень защиты IP44

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды °C:

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta'_1 + \Delta\theta_b.$$

12. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИИ

В электрических машинах общего назначения применяют следующие способы охлаждения: для машин защищенного исполнения IP23 – внутреннюю самовентиляцию, а для машин закрытого исполнения IP44 – наружную самовентиляцию. Для этого применяют центробежные вентиляторы (рис. 25) с радиальным расположением вентиляционных лопаток.

Основными размерами такого вентилятора являются наружный диаметр D_n , внутренний диаметр $D_{вн}$, ширина лопаток b_l и их число N_l . Вентилятор жестко закрепляют на валу машины, и при ее работе он вращается вместе с ротором. Перемещение охлаждающего воздуха происходит под действием центробежных сил.

Расчет вентилятора сводится к определению его размеров, которые при заданной частоте вращения машины обеспечивают требуемый расход охлаждающего воздуха Q_v , м³/с.

При внутренней самовентиляции

$$Q_v = \frac{0,4510^{-3} \Sigma P_B}{\Delta \theta_B},$$

где ΣP_B – суммарные потери в машине, Вт; $\Delta \theta_B$ – превышение температуры воздуха на выходе из машины над температурой на входе в машину, °С.

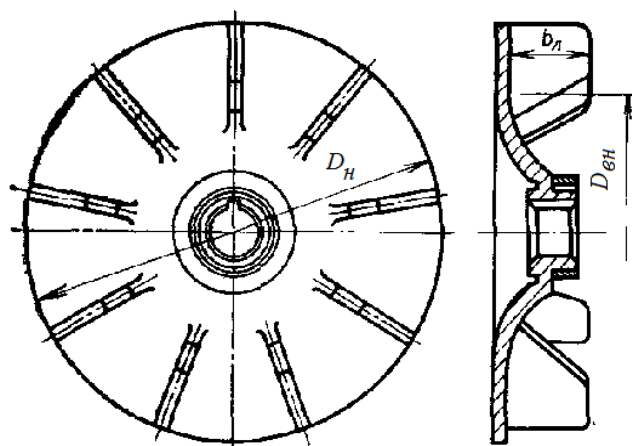


Рис. 25. Центробежный вентилятор

При наружной самовентиляции

$$Q_B = \frac{0,9 \cdot 10^{-3} \cdot m \sum P_B \cdot \sqrt{n_{\text{НОМ}} \cdot 10^{-3} \cdot D_H \cdot 10^{-2}}}{\Delta \theta_B}$$

Значение коэффициента m принимают в зависимости от высоты оси вращения машины h и числа полюсов $2p$ (табл. 23)

Таблица 23

h	≤ 132	≤ 132	160...400	160...400
$2p$	2	4...8	2	4...12
m	2,6	1,8	3,3	2,5

Наружный диаметр D_H принимают в зависимости от конструкции машины и системы вентиляции.

При внутренней самовентиляции наружный диаметр вентилятора равен наружному диаметру ротора $D_H = D_2$, при наружной самовентиляции принимают $D_H \approx (1,6 \dots 1,8)h$.

Окружная скорость лопаток по наружному диаметру вентилятора, м/с:

$$v_H = \frac{\pi \cdot D_H \cdot n_{\text{НОМ}}}{60 \cdot 10^3}$$

Поперечное сечение межлопаточного канала на выходе воздуха, мм²:

$$S_B = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot Q_B}{0,45 \cdot v_H}$$

Аэродинамическое сопротивление, Па · с²/м⁶:

$$Z = \frac{12,3(n_{\text{НОМ}} \cdot 10^{-3})^2 \cdot (D_{1H} \cdot 10^{-2})^2}{Q_B^2}$$

Окружная скорость лопаток по внутреннему диаметру вентилятора, м/с:

$$v_{BH} = \sqrt{v_H - 1,85ZQ_B^2}$$

Внутренний диаметр вентилятора

$$D_{BH} = \frac{60 \cdot 10^3 \cdot v_{BH}}{\pi n_{\text{НОМ}}}$$

Для центробежных встроенных вентиляторов отношение диаметров должно быть в пределах

$$D_{\text{н}}/D_{\text{вн}} = 1,2 \dots 1,5.$$

Для наружных вентиляторов

$$D_{\text{н}}/D_{\text{вн}} = 2,0 \dots 2,5.$$

Число лопаток вентилятора

$$N_{\text{л}} = \frac{(6 \dots 10)D_{\text{н}}}{(D_{\text{н}} - D_{\text{вн}})}.$$

В целях уменьшения вентиляционного шума рекомендуется число лопаток применять нечетным.

Площадь одной лопатки вентилятора, мм²:

$$S_{\text{л}} = \frac{S_{\text{в}} \cdot (D_{\text{н}} - D_{\text{вн}})}{2 \cdot \pi \cdot D_{\text{н}}}.$$

ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

1. Какие АД относятся к двигателям общепромышленного назначения?
2. Конструктивное исполнение электрических машин и степень защиты.
3. Условное обозначение АД серии 4А.
4. К чему приводит увеличение плотности тока в статорной обмотке АД?
5. Расчет активной части двигателя.
6. Как обеспечивается надежность работы двигателя?
7. Какое влияние оказывает величина воздушного зазора на КПД и $\cos\phi$ двигателя?
8. Какой формы пазы применяют в сердечнике статора?
9. От чего зависит выбор формы пазов короткозамкнутого ротора?
10. Шаг обмотки статора.
11. Вид применяемых обмоток статора.
12. Расчет параметров обмотки статора и ротора.
13. Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя.
14. Пусковые характеристики асинхронного двигателя.
15. Потери мощности и КПД асинхронного двигателя.
16. Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя.
17. Тепловой расчет асинхронного двигателя.
18. Расчет вентиляции асинхронного двигателя.
19. Класс нагревостойкости изоляции обмоток, применяемый в асинхронных двигателях общего назначения.
20. Способы охлаждения электрических машин общего назначения.

21. Защита электрических машин от внешних воздействий. Климатические условия и условия размещения.
22. Принцип действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
23. Способы пуска асинхронных двигателей.
24. Внутренняя и наружная самовентиляции, достоинства и недостатки.
25. Механическая и электромеханическая характеристики асинхронного двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется созданию новых видов электрических машин, удовлетворяющих современным требованиям к качеству и технико-экономическим показателям.

Наиболее распространенным двигателем общепромышленного назначения является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, как более простой и дешевый в изготовлении и надежный в эксплуатации.

В пособии рассмотрены основные вопросы проектирования и расчета асинхронного двигателя на базе ранее выпускаемых АД серии 4А.

Данное учебное пособие включает в себя рекомендации по расчету главных размеров двигателя, активной части двигателя, обмоток статора, воздушного зазора, обмоток короткозамкнутого ротора, магнитной цепи, потерь мощности и КПД, рабочих характеристик, пусковых параметров, тепловому расчету и расчету вентиляции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зарандия, Ж. А.** Электрические машины [Электронный ресурс] : учебные пособие / Ж. А. Зарандия, А. В. Кобелев. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. – Загл. с экрана.
2. **Зарандия, Ж. А.** Электрические машины и электропривод в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ж. А. Зарандия, Е. А. Печагин, Н. П. Моторина. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – Загл. с экрана.
3. **Кацман, М. М.** Расчет и конструирование электрических машин : учебное пособие для техникумов / М. М. Кацман. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
4. **Беспалов, А. В.** Проектирование асинхронного двигателя общего назначения с короткозамкнутым ротором : учебное пособие для курсового проектирования / А. В. Беспалов. – Нижневартовск : Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2012. – 154 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	4
2. РАСЧЕТ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ ДВИГАТЕЛЯ	11
3. РАСЧЕТ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ДВИГАТЕЛЯ	14
4. РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА	25
5. РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА	36
6. РАСЧЕТ ОБМОТОК КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА	37
7. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ	45
8. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И КПД АД	53
9. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ	56
10. РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ	60
11. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ АД	64
12. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИИ	72
ВОПРОСЫ К ЗАЩИТЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	78

Учебное электронное издание

ЗАРАНДИЯ Жанна Александровна
КОБЕЛЕВ Александр Викторович
КОЗЛОВА Юлия Алексеевна
КАГДИН Алексей Николаевич

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова
Графический и мультимедийный дизайнер Н. И. Кужильная
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбаровой

ISBN 978-5-8265-2613-2



Подписано к использованию 03.07.2023.
Тираж 50 шт. Заказ № 73

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел./факс (4752) 63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru