

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

**Кафедра электротехники**

*В. Н. ГАЛУШКО, И. С. ЕВДАСЕВ,  
В. А. ПАЦКЕВИЧ, А. В. ДРОБОВ*

# **РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**Пособие для выполнения курсовой работы**

**Гомель 2016**

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

***В. Н. ГАЛУШКО, И. С. ЕВДАСЕВ,  
В. А. ПАЦКЕВИЧ, А. В. ДРОБОВ***

# РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Пособие для выполнения курсовой работы

Гомель 2016

УДК 621.3 (075.8)  
ББК 31.261  
Г16

Р е ц е н з е н т – заведующий кафедрой «Электрический подвижной состав»  
канд. техн. наук, доцент *В. С. Могила* ( УО «БелГУТ»)

**Галушко, В. Н.**

**Г16** Расчет асинхронных двигателей : Пособие для выполнения курсовой работы / В. Н. Галушко, И. С. Евдасев, В. А. Пацкевич, А. В. Дробов ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2016. – 158 с.

ISBN 978-985-554-487-7 (ч. II)

В пособии рассмотрены вопросы проектирования электрических машин общего назначения, особенности проектирования асинхронных двигателей мощностью до 1000 кВт; а также приведена расчетная оценка их надежности.

**УДК 621.3 (075.8)**  
**ББК 31.261**

**ISBN 978-985-554-487-7** © Галушко В. Н., Евдасев И. С., Пацкевич В. А., Дробов А. В., 2016  
**ISBN 978-985-468-782-7** © Оформление. УО «БелГУТ», 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для выполнения курсовой работы по дисциплине «Электрические машины и преобразователи» студентами дневной и заочной формы обучения Белорусского государственного университета транспорта. Решение курсовой работы способствует более глубокому усвоению теории, позволяет сконцентрировать внимание обучающихся на ее узловых положениях. При разработке данного учебного пособия использован материал [1].

Курсовая работа, выполненная на основании данного пособия, должна состоять из расчетной записки с графиками и эскизами. Расчетные точки, через которые проводятся линии графика, должны быть видны на кривых. Для координатных осей необходимо выбирать равномерные масштабы, кратные 1; 2; 2,5; 5; 10; и т.д., во всем диапазоне изменения величины, при этом по оси абсцисс откладывается только один масштаб какой-нибудь величины, например  $P_2$ , а по направлению оси ординат можно построить несколько масштабных осей по числу рассматриваемых зависимостей, например  $I_1 = f_1(P_2)$ ;  $\cos\varphi_1 = f_2(P_2)$ ;  $n = f_3(P_2)$  и т.д. Все вертикальные шкалы должны быть оцифрованы равномерно на одной высоте и должны начинаться с нуля. При выполнении работы необходимо применять стандартные условные обозначения электрических величин, единиц их измерения и условные графические обозначения элементов электрических цепей по ГОСТам.

Расчетная записка курсовой работы пишется на одной стороне листа формата A4 с обязательным оставлением полей для замечаний рецензента. В записке приводятся необходимые расчеты, таблицы, пояснения, перечень использованной литературы. Листы, рисунки и таблицы пояснительной записки должны быть пронумерованы. Применять сокращения не следует, кроме общепринятых.

Результаты расчетов округляются до трех значащих цифр. Ошибки, отмеченные рецензентом, исправляются аккуратно. Для исправлений можно использовать обратную (чистую) сторону предыдущего листа.

Для успешного выполнения курсовой работы необходимо изучить по [2] или любому учебнику по электрическим машинам соответствующий теоретический раздел.

# 1 ЕДИНЫЕ СЕРИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

## 1.1 Общие сведения

Асинхронные двигатели (АД) – это бесколлекторные двигатели переменного тока, у которых в установившемся режиме магнитное поле, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор имеют различные частоты вращения.

Асинхронные двигатели широко применяются в приводах металлообрабатывающих, деревообрабатывающих и других станков, кузнечно-прессовых, ткацких, швейных, грузоподъемных, землеройных машин, вентиляторов, насосов, компрессоров, центрифуг, в лифтах, в электроинструменте, в бытовых приборах и т. д. Практически нет отрасли техники и быта, где не использовались бы асинхронные двигатели.

Потребности народного хозяйства удовлетворяются главным образом двигателями основного исполнения единых серий общего назначения, т. е. применяемых для привода механизмов, не предъявляющих особых требований к пусковым характеристикам, скольжению, энергетическим показателям, шуму и т. п. Вместе с тем в единых сериях предусматривают также электрические и конструктивные модификации двигателей, модификации для разных условий окружающей среды, предназначенные для удовлетворения дополнительных специфических требований отдельных видов приводов и условий их эксплуатации. Модификации создаются на базе основного исполнения серий с максимально возможным использованием узлов и деталей этого исполнения.

В некоторых приводах возникают требования, которые не могут быть удовлетворены двигателями единых серий. Для таких приводов созданы специализированные двигатели, например электробуровые, крано-металлургические и др.

Разработанное и внедренное в производство основное исполнение единой серии подразделяется на два основных ряда: серию с  $h = 50 \div 355$  мм (мощностью от 0,12 до 400 кВт при  $2p = 4$ ) и серию  $h = 400 \div 450$  мм (мощностью от 400 до 1000 кВт при  $2p = 4$ ).

**Серия 4А. Основное исполнение серии.** Двигатели выполняются с короткозамкнутым (КЗР) (при  $h = 50 \div 355$  мм) и с фазным роторами (при  $h = 200 \div 355$  мм). По степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения различают: закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от вентилятора, расположенного на валу двигателя (IC0141) при  $h = 50 \div 355$  мм; защищенное исполнение (IP23) с самовентиляцией (IC01) при  $h = 160 \div 355$  мм.

Двигатели мощностью от 0,12 до 0,37 кВт изготавливают на номинальные напряжения 220 и 380 В, со схемой соединения обмоток статора  $\Delta$  или  $Y$ ; эти двигатели имеют три выводных провода. Двигатели мощностью от 0,55 до 11 кВт, кроме того, выполняют на напряжение 660 В (при тех же схемах соединения и количестве выводных проводов). Двигатели мощностью от 15 до 110 кВт изготавливают на номинальные напряжения 220/380 и 380/660 В, а от 132 до 400 кВт – только на 380/660 В; эти двигатели имеют схему соединения  $\Delta/Y$  и шесть выводных проводов. Двигатели с  $h = 50 \div 132$  мм выполняют с изоляцией класса нагревостойкости В; остальные – с изоляцией класса F. Общие технические данные на указанные двигатели регламентированы ГОСТ 19523.

*Модификации серии 4А при  $h = 50 \div 355$  мм.* На базе основного исполнения серии изготавливаются следующие электрические модификации:

- двигатели с повышенным пусковым моментом ( $h = 160 \div 250$  мм), предназначенные для привода механизмов, имеющих большие статические и инерционные нагрузки в момент пуска (компрессоры, конвейеры, насосы, поворотные круги и т. д.);

- двигатели с повышенным скольжением ( $h = 71 \div 250$  мм) – для работы в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками или с пульсирующей нагрузкой (штамповочные прессы, молоты, поршневые компрессоры и т. д.);

- многоскоростные двигатели ( $h = 56 \div 355$  мм) на две, три и четыре частоты вращения – для привода механизмов со ступенчатым регулированием частоты вращения (металлообрабатывающие станки, механические колосниковые решетки, некоторые виды лебедок и т. д.);

- двигатели на частоту 60 Гц ( $h = 50 \div 355$  мм) – для работы от сети с указанной частотой.

Серия охватывает следующие конструктивные модификации: малозумные двигатели ( $h = 56 \div 160$  мм) – для работы в приводах с повышенными требованиями к уровню шума; встраиваемые двигатели ( $h = 50 \div 250$  мм) – для встраивания в станки и механизмы;

двигатели со встроенной температурной защитой ( $h = 50 \div 355$  мм) – для привода механизмов, работающих со значительными перегрузками, частыми пусками, и т. д.

Серия охватывает следующие модификации по условиям окружающей среды:

- двигатели тропического исполнения ( $h = 50 \div 355$  мм) – для работы в условиях влажного или сухого тропического климата при температуре окружающего воздуха от  $-10$  до  $+45$  °С, относительной влажности до

100 % (при температуре  $+35^{\circ}\text{C}$ ), при воздействии солнечной радиации, песка, пыли и плесневых грибов;

– двигатели влагоморозостойкого исполнения ( $h = 50\div 355$  мм) – для работы при температуре окружающей среды до  $-40^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности 100 % (при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ );

– двигатели химостойкого исполнения ( $h = 50\div 355$  мм) – для работы при температуре окружающей среды в пределах  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ , относительной влажности 80 % (при температуре  $+25^{\circ}\text{C}$ ), наличии химически активной невзрывоопасной среды.

Серия охватывает следующие исполнения по степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения:

– защищенное исполнение (IP23) с самовентиляцией (IC01) при  $h = 400$  и  $450$  мм;

– закрытое исполнение (IP44) с охлаждением с помощью воздухоохладителя (IC0161) при  $h = 400$  и  $450$  мм.

Двигатели изготавливают с короткозамкнутым или фазным ротором и на номинальное напряжение 6000 В. Обмотка статора имеет шесть выводных проводов, соединенных в звезду.

В [1] приведены технические данные трехфазных асинхронных двигателей, выпускаемых Ярославским электромашиностроительным заводом.

## 1.2 Исходные данные для проектирования

Для проектирования асинхронного двигателя должны быть заданы следующие исходные данные:

1. Номинальный режим работы по ГОСТ 183.
2. Исполнение ротора (короткозамкнутый, фазный).
3. Номинальная отдаваемая мощность ( $P_2$ ) по ГОСТ 12139–84.
4. Количество фаз статора ( $m_1$ ).
5. Способ соединения фаз статора (Y/ $\Delta$ ;  $\Delta$ ; Y).
6. Частота сети ( $f$ ).
7. Номинальное линейное напряжение ( $U$ ) по ГОСТ 21128–83.
8. Синхронная частота вращения ( $n_1$ ) по ГОСТ 10683.
9. Степень защиты от внешних воздействий по ГОСТ 14254–96 СТ 247.
10. Способ охлаждения по ГОСТ 20459–87.
11. Исполнение по способу монтажа по СТ 246.
12. Климатические условия и категория размещения по ГОСТ 15150 и 15543.
13. Надежность по ГОСТ 27.002–89.
14. Форма выступающего конца вала.
15. Способ соединения с приводимым механизмом.

Кроме того, дополнительно учитывают требования к высоте оси вращения по ГОСТ 13267 и к установочно-присоединительным размерам по ГОСТ 18709 или 20839. Содержание перечисленных выше предписаний стандартов приведено в [1]. Во всем неоговоренном исходные данные АД должны удовлетворять требованиям ГОСТ 183–74.

*Примечание* – Количество пар полюсов определяем по формуле

$$p = 60f / n_1. \quad (1.1)$$

### Пример исходных данных для проектирования

Наименование заданных параметров и их условное обозначение	Двигатель № 1	Двигатель № 2
Номинальный режим работы	Продолжительный (S1)	
Исполнение ротора	Короткозамкнутый	Фазный
Номинальная отдаваемая мощность $P_2$ , кВт	7,5	160
Количество фаз статора $m_1$	3	3
Способ соединения фаз статора	$\Delta/Y$	$\Delta/Y$
Частота сети $f$ , Гц	50	50
Номинальное линейное напряжение $U$ , В	220 / 380	380 / 660
Синхронная частота вращения $n_1$ , об/мин	1500	1000
Степень защиты от внешних воздействий	IP44	IP23
Способ охлаждения	IC0141	IC01
Исполнение по способу монтажа	IM1001	IM1001
Климатические условия и категория размещения	У3	У3
Вероятность безотказной работы обмотки за наработку 10000 ч ( $P_{об}$ )	0,9	0,9
Форма выступающего конца вала	Цилиндрическая	
Способ соединения с приводным механизмом	Упругая муфта	
Количество пар полюсов $p$ , определяемое по (1.1)	2	3

### 1.3. Магнитная цепь двигателя. Размеры, конфигурация, материал

**Главные размеры.** Проектирование асинхронных двигателей начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра  $D_1$  и



длины сердечника статора  $l_1$ . Как отмечалось в главе 1 [1], предельно допускаемая величина наружного диаметра корпуса  $D_{\text{корп}}$  и сердечника статора  $D_{\text{н1}}$  зависит от высоты оси вращения  $h$ . Если заданием на проектирование значение  $h$  не регламентировано, то его предварительно выбирают из таблицы 1.1, данные которой соответствуют существующему в России и за рубежом среднему уровню привязки мощностей к  $h$  двигателей с разными степенями защиты и способами охлаждения.

В таблице 1.1 приведены также значения вращающего момента на валу  $M_2$ , поскольку в настоящее время широко распространена более удобная оценка привязки габаритов двигателя к моменту вращения, значение которого для данного типоразмера колеблется в относительно небольших пределах при исполнении двигателя с разным количеством полюсов (за исключением двигателей с  $2p = 2$ ).

Таблица 1.1 – Значения вращающего момента на валу

$h$ , мм	$P_2$ (кВт) при синхронных частотах вращения, об/мин						$M_2$ , Н·м (при 1500 об/мин)
	3000	1500	1000	750	600	500	
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором исполнения по защите IP44, со способом охлаждения IC0141							
56	0,18	0,12	—	—	—	—	0,77
	0,25	0,18	—	—	—	—	1,15
63	0,37	0,25	0,18	—	—	—	1,59
	0,55	0,37	0,25	—	—	—	2,35
71	0,75	0,55	0,37	0,25	—	—	3,5
	1,1	0,75	0,55	—	—	—	4,74
80	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—	7,0
	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—	9,5
90	3	2,2	1,5	0,75	—	—	14
100	4	3	2,2	1,5	—	—	19
	5,5	4	—	—	—	—	25,4
112	7,5	5,5	3	2,2	—	—	35
	—	—	4	3	—	—	
132	11	7,5	5,5	4	—	—	47,4
	—	11	7,5	5,5	—	—	70
160	15	15	11	7,5	—	—	95,3
	18,5	18,5	15	11	—	—	118
180	22	22	18,5	15	—	—	140
	30	30	—	—	—	—	190
200	37	37	22	18,5	—	—	234,5

	45	45	30	22	—	—	284
225	55	55	37	30	—	—	349
250	75	75	45	37	—	—	474
	90	90	55	45	—	—	574
280	110	110	75	55	—	—	699
	132	132	90	75	—	—	838
315	160	160	110	90	55	45	1018
	200	200	132	110	75	55	1267

*Продолжение таблицы 1.1*

355	250	250	160	132	90	75	1592
	315	315	200	160	110	90	2006
400	—	315	250	200	—	—	2006
	—	400	315	250	200	—	2545
	—	500	400	—	—	—	3183
450	—	630	500	315	250	200	4012
	—	800	630	400	315	250	5094
	—	—	—	500	—	—	—
<b>Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором исполнения по защите IP23, со способом охлаждения IC01</b>							
160	22	18,5	11	7,5	—	—	118
	30	22	15	11	—	—	140
180	37	30	18,5	15	—	—	190
	45	37	22	18,5	—	—	235
200	55	45	30	22	—	—	284
	75	55	37	30	—	—	349
225	90	75	45	37	—	—	474
250	110	90	55	45	—	—	574
	132	110	75	55	—	—	699
280	160	132	90	75	—	—	838
	200	160	110	90	—	—	1018
315	—	200	132	110	75	55	1267
	200	250	160	132	90	75	1592
355	315	315	200	160	110	90	2005
	400	400	250	200	132	110	2550
400	—	400	315	—	—	—	2550
	—	500	400	250	200	—	3183
	—	630	500	315	250	—	4010
450	—	800	630	400	315	250	50093

	–	1000	800	500	400	315	6367
	–	–	–	630	–	–	–
<b>Асинхронные двигатели с фазным ротором исполнения по защите IP23, со способом охлаждения IC01</b>							
200	–	37	22	18,5	–	–	235
	–	45	30	22	–	–	284
225	–	55	37	30	–	–	349
	–	75	45	37	–	–	474

*Продолжение таблицы 1.1*

250	–	90	55	45	–	–	574
	–	110	75	55	–	–	699
280	–	132	90	75	45	–	838
	–	160	110	90	55	–	1018
315	–	200	132	110	75	55	1267
	–	250	160	132	90	75	1592
355	–	315	200	160	110	90	2006
	–	400	250	200	132	110	2547
400	–	400	315	250	200	–	2547
	–	500	400	315	250	–	3193
	–	630	500	–	–	–	4012
450	–	800	630	400	315	250	5094
	–	1000	800	500	400	315	6367
	–	–	–	630	–	–	–

Для удобства выбора наружного диаметра сердечника  $D_{н1}$  при заданной или выбранной стандартной высоте оси вращения  $h$  в таблице 1.2 приведены предельно допустимые значения  $D_{н1max}$  для  $h = 50 \div 450$  мм, указаны припуски на штамповку  $\Delta_{шт}$ , а также ширина резаных лент и стандартной рулонной стали, из которой штампуют листы сердечника.

*Таблица 1.2 – Предельно допустимые значения  $D_{н1max}$*

$h$ , мм	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$D_{н1max}$ , мм	$\Delta_{шт}$ , мм	Ширина (мм) при однорядной штамповке из	
					резаных лент	рулонной стали
50	3	4	86	4	90	–
56	4	4	96	4	100	–
63	4	5	108	5	113	–
71	4	6	122	5	127	–
80	4	6,5	139	6	145	–
90	5	6,5	157	6	163	–
100	5	7,5	175	7	182	–
112	5	8,5	197	7	204	–
132	6	9,5	233	7	240	–

160	6	11,5	285	7	292	—
180	7	12	322	7	330	—
200	7	13,5	359	8	367	—
225	7	15	406	8	414	—
250	8	16	452	8	460	—
280	8	12	520	10	—	530
315	7	13	590	10	—	600
355	0	15	660	10	—	670
400	14	16	740	10	—	750
450	9	16	850	10	—	860

При составлении таблицы 1.2 имелось в виду, что двигатели с  $h = 50\div 250$  мм выполняются с литыми станинами, а двигатели с  $h = 280\div 450$  мм со сварными.

При  $D_{н1} \leq 452$  мм (что соответствует  $h \leq 250$  мм) листы статора штампуют из резаной ленты, которая по согласованию сторон может поставляться различной ширины, но не превышающей 500 мм. При  $D_{н1} > 452$  мм листы статора штампуют из рулонной стали стандартной ширины, указанной в [1]; соответственно принятые в этом случае значения  $h_1$  могут несколько отличаться от указанных на рисунке 1.1.

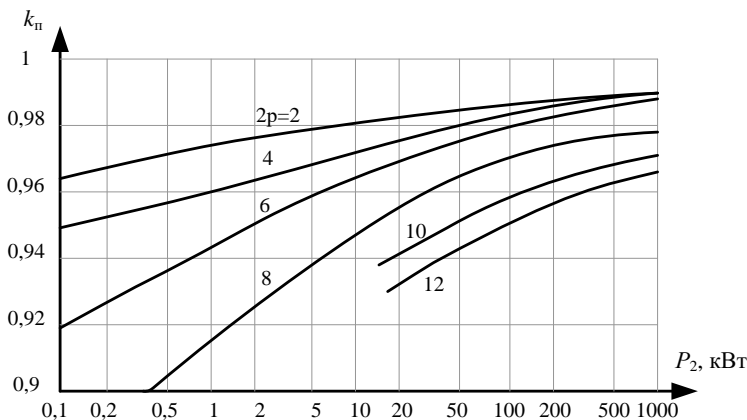


Рисунок 1.1 – Средние значения АД

Для определения одного из главных размеров – внутреннего диаметра сердечника статора  $D_1$  – можно использовать зависимости  $D_1 = f(D_{н1})$ , приведенные в таблице 1.3. При проектировании части серии (двух двигателей и более на одном диаметре  $D_{н1}$ ) для облегчения производства необходимо унифицировать при данном количестве полюсов основные размеры магнитопровода двигателя в его поперечном сечении –

диаметры  $D_{н1}$ ,  $D_1$ ,  $D_{н2}$ , а также количество и размеры пазов статора и ротора.

Расчетную мощность  $P'$  определяют по формуле  $P' = k_n P_2 / (\eta' \cos \varphi')$ .

Причем значение  $k_n$  находят из рисунка 1.1, а предварительные значения  $\eta'$  и  $\cos \varphi'$  для двигателей с короткозамкнутым ротором могут быть приняты на уровне средних энергетических показателей выпускаемых электродвигателей (рисунки 1.2 и 1.3) или по ГОСТ 19523\*. Для двигателей с фазным ротором исполнения по защите IP23 предварительные значения  $\eta'$  могут быть приняты на 0,005 ниже, чем по рисунку 1.2, а  $\cos \varphi$  на 0,01 ниже, чем по рисунку 1.3.

\*Здесь и далее предварительные значения параметров обозначаются знаком «штрих» для отличия от уточняемых в дальнейшем значений.

Таблица 1.3 – Зависимости  $D_1 = f(D_{н1})$

$2p$	$D_{н1}$ , мм	$D_1 = f(D_{н1})$ , мм
2	80–360	$D_1 = 0,61 D_{н1} - 4$
	Свыше 360–750	$D_1 = 0,485 D_{н1} + 28$
4	80–520	$D_1 = 0,68 D_{н1} - 5$
	Свыше 520–990	$D_1 = 0,56 D_{н1} + 60$
6	80–590	$D_1 = 0,72 D_{н1} - 3$
	Свыше 590–990	$D_1 = 0,6 D_{н1} + 82$
8	80–590	$D_1 = 0,72 D_{н1} - 3$
	Свыше 590–990	$D_1 = 0,6 D_{н1} + 100$
10 и 12	500–990	$D_1 = 0,6 D_{н1} + 110$

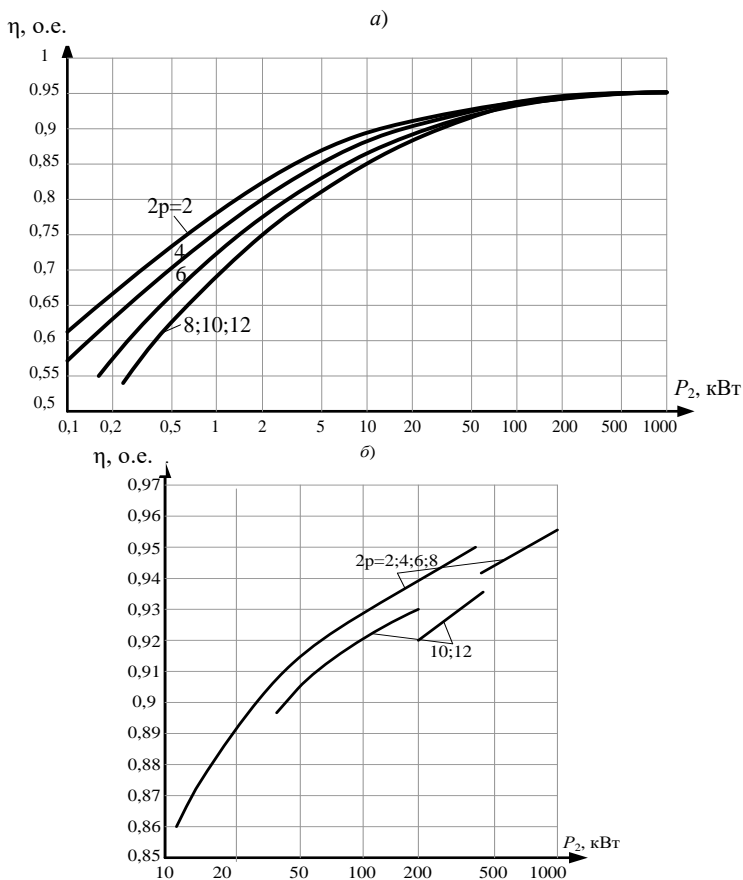


Рисунок 1.2 – Средние значения  $\eta=f(P_2)$  АД с короткозамкнутым ротором:  
 а – исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141;  
 б – исполнение по защите IP23, способ охлаждения IC01

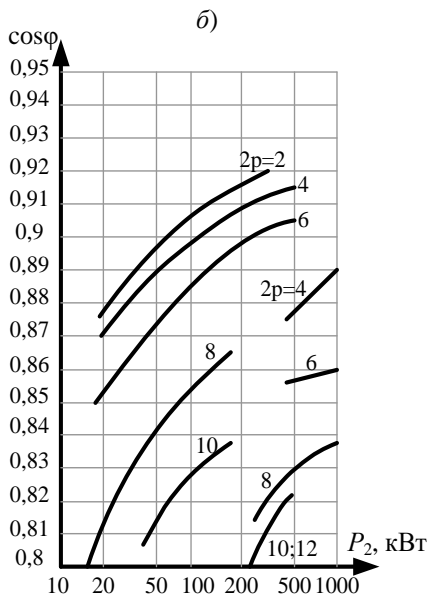
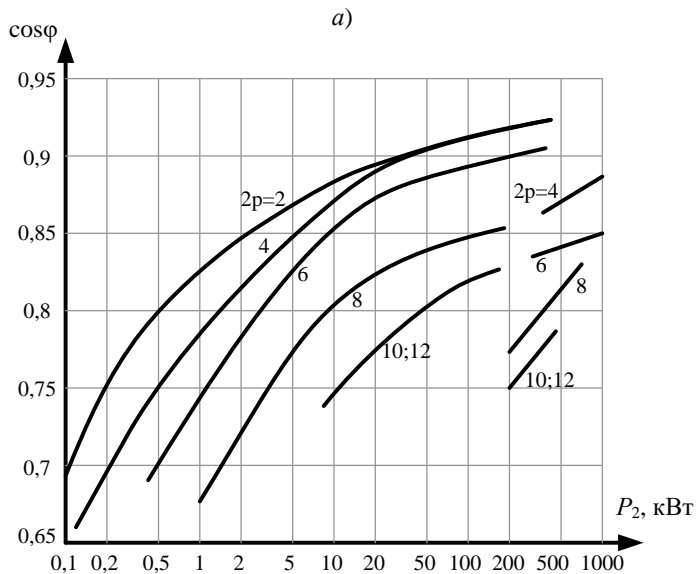


Рисунок 1.3 – Средние значения  $\cos\varphi$  АД с короткозамкнутым ротором:  
 а – исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141;  
 б – исполнение по защите IP23, способ охлаждения IC01

Для определения второго главного размера – длины сердечника статора  $l_1$  – вначале по (1.2) находят расчетную длину сердечника  $l'_1$  (с соответствующим округлением).

$$l'_1 = \frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot P'}{D_1^2 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot B_\delta \cdot k_{\text{об1}}} \quad (1.2)$$

При этом следует задать предварительные значения обмоточного коэффициента  $k'_{\text{об1}}$  ( $k'_{\text{об1}} = 0,91 \div 0,94$  для  $2p \geq 4$ ;  $k'_{\text{об1}} = 0,79$  для  $2p = 2$ ; большие значения  $k'_{\text{об1}}$  принимают для двигателей меньшей мощности), а также электромагнитных нагрузок  $A'_1$  и  $B'_\delta$  (значения  $A'_1$  и  $B'_\delta$  зависят от ряда факторов, в том числе от формы пазов и типа обмотки). В таблице 1.4 указаны применяемые в настоящее время формы пазов и типы обмоток статора.

**Таблица 1.4 – Применяемые формы пазов и типы обмоток статора**

Высота оси вращения $h$ , мм	Форма паза	Тип обмотки
50–160	Трапецеидальные полузакрытые	Однослойная всыпная концентрическая
180–250	То же	Двухслойная или одно-двухслойная всыпная
280–315 ( $2p = 10; 12$ )	»	
280–355 ( $2p = 2; 4; 6; 8$ )	Прямоугольные полукоткрытые	Двухслойная из жестких катушек
355 ( $2p = 10; 12$ )	То же	То же
400–450	Прямоугольные открытые	Двухслойная из жестких катушек

Форма пазов, указанная в таблице, определяется тем, что статоры с прямоугольными (открытыми или полукоткрытыми) пазами обладают большей надежностью обмотки, выполняемой из жестких изолированных катушек, а также большим коэффициентом заполнения пазов медью проводов прямоугольного поперечного сечения. Однако со снижением  $h$  возникают технологические затруднения, ограничивающие возможность применения прямоугольных пазов статора, из-за уменьшения поперечного сечения проводов и ширины зубца в наиболее узком месте.



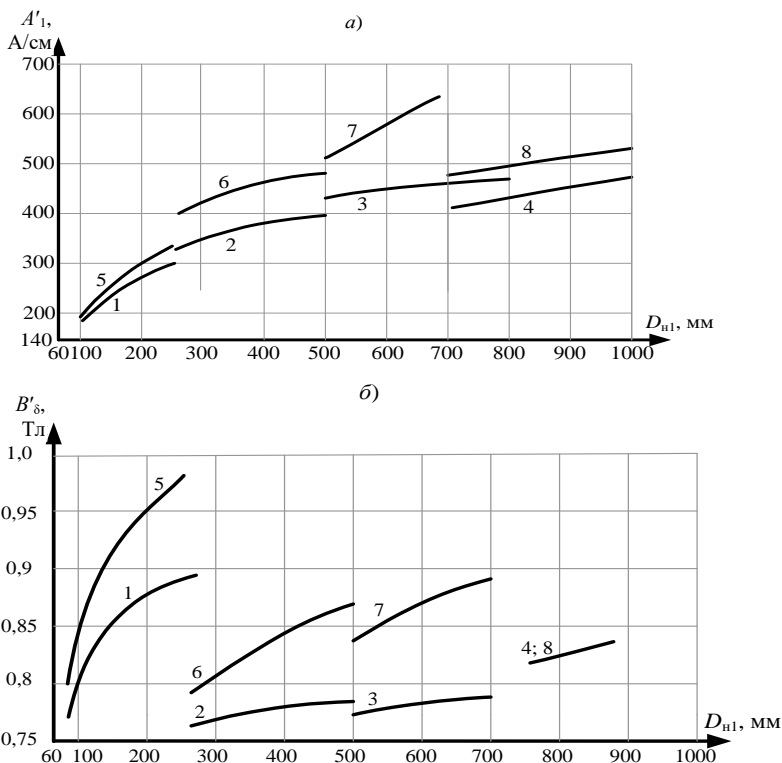


Рисунок 1.4 – Средние значения  $A'_1=f(D_{н1})$  (а),  $B'_\delta=f(D_{н1})$  (б) при  $2p = 4$  и классе нагревостойкости  $F$ : 1 – исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141, полузакрытые пазы однослойная обмотка; 2 – то же, что 1, но двухслойная обмотка; 3 – IP44, IC0141, полузакрытые пазы, двухслойная обмотка, продуваемый ротор; 4 – IP44, IC0141, открытые пазы,  $U=6000$  В, двухслойная обмотка;

5 – IP23, IC01, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; 6 – то же, что 5, но двухслойная обмотка; 7 – IP23, IC01, полуоткрытые пазы, двухслойная обмотка; 8 – IP23, IC01, открытые пазы,  $U=6000$  В, двухслойная обмотка

Поэтому в асинхронных двигателях, начиная примерно с  $D_{н1} \leq 452$  мм (что соответствует  $h \leq 250$  мм), выполняют полузакрытые пазы трапецидальной формы со вспянутой обмоткой из проводов круглого поперечного сечения, при которых коэффициент заполнения паза медью снижается. Компенсирует в некоторой степени указанное снижение возможность получения зубцов равновеликого сечения и постоянства магнитной индукции по высоте зубца, в отличие от прямоугольных

пазов, при которых зубец имеет трапецеидальную форму и магнитную индукцию, увеличивающуюся в направлении основания паза.

На рисунке 1.4 приведены средние значения  $A'_1$  и  $B'_8$  для асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным роторами при  $2p=4$  и с изоляцией класса нагревостойкости  $F$ . При количестве полюсов, отличающихся от  $2p=4$ , принимаемые из рисунка 1.4 значения  $A'_1$  и  $B'_8$  умножают на поправочные коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  (таблице 1.5).

Кроме того, при выполнении электродвигателей с изоляцией классов нагревостойкости  $B$  или  $H$  значение  $A'_1$ , принятое по рисунку 1.4 с учетом  $k_1$ , должно быть умножено на поправочный коэффициент  $k_3$  (для класса  $B - k_3 = 0,86$ ; для класса  $H - k_3 = 1,14$ ).

Таблица 1.5 – Поправочные коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$

Коэффициенты	Степень защиты, способ охлаждения	$D_{н1}$ , мм	Коэффициенты при различных значениях $2p$			
			2	6	8	10 и 12
$k_1$ (для $A'_1$ )	IP44, IC0141	80-250	0,93	1,0	1,0	–
		Свыше 250-500	1,1	0,93	0,93	–
		500-700	1,1	0,915	0,915	0,84
		700-990	–	0,92	0,87	0,84
	IP23, IC01	250-500	1,16	0,9	0,84	0,72
		500-700	1,15	0,89	0,84	0,72
		700-990	–	0,9	0,88	0,85
$k_2$ (для $B'_8$ )	IP44, IC0141	80-250	1,0	1,0	1,2	–
		Свыше 250-700	0,96	1,04	1,04	1,04
		700-990	–	0,96	0,94	0,92
	IP23, IC01	250-700	0,98	1,02	1,02	1,04
		700-990	–	0,97	0,94	0,925

Следует иметь в виду, что при современных высоких требованиях к величинам пусковых моментов электродвигателей с  $h \leq 132$  мм может возникнуть необходимость проектирования двигателей с пониженными значениями  $A'_1$ .

Конструктивная длина сердечника статора  $l_1$  при отсутствии в сердечнике радиальных вентиляционных каналов равна расчетной длине  $l'_1$ , округленной до ближайшего целого числа (при длине менее 100 мм) и до ближайшего числа, кратного пяти (при длине более 100 мм); соответственно изменяется значение  $l_1$ . При длине сердечника более 300–350 мм применяются радиальные вентиляционные каналы. В этом случае

$l_1$  определяется по формуле (1.3) с округлением до ближайшего числа, кратного пяти.

$$l_1 = l'_1 + n_{к1} l_{к1}, \quad (1.3)$$

где  $n_{к1}$ ,  $l_{к1}$  – число и длина каналов.

Количество вентиляционных каналов  $n_{к1}$  определяется длиной одного пакета сердечника статора  $l_{н1}$ , выбираемой в пределах 55–75 мм при длине вентиляционного канала  $l_{к1} = 10$  мм. Отношение

$$\lambda = l_1 / D_1 \quad (1.4)$$

целесообразно выбирать таким, чтобы оно приближалось к предельному допускаемому отношению  $\lambda_{\max}$ , вычисляемому для двигателей с  $2p = 4$  по формулам, приведенным в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Формулы для определения  $\lambda_{\max}$

Степень защиты, способ охлаждения	$D_{н1}$ , мм	Значения $\lambda_{\max}$
IP44, IC0141	80 – 700	$1,46 - 0,00071 D_{н1}$
IP23, IC01	250 – 700	$1,33 - 0,00087 D_{н1}$
IP44, IC0141, IP23, IC01	Свыше 700 – 990	$1,56 - 0,00088 D_{н1}$

При количестве полюсов, отличающихся от  $2p = 4$ , значение  $\lambda_{\max}$ , полученное из таблицы 1.6, должно быть умножено на поправочный коэффициент  $k_4$  для электродвигателей со степенями защиты IP23 и IP44 (таблица 1.7)

Таблица 1.7 – Поправочный коэффициент  $k_4$

$D_{н1}$ , мм	Коэффициенты $k_4$ при различных значениях $2p$		
	2	6	8, 10 и 12
80 – 700	0,95	1,05	1,1
Свыше 700 – 990	–	–	1,15

Если  $\lambda$  превышает  $\lambda_{\max}$ , то, как указано в [1], необходимо перейти на другую, большую стандартную высоту оси вращения и повторить расчет главных размеров и  $\lambda$ .

При проектировании участка серии с двумя или тремя длинами сердечника статора на одном диаметре значение  $\lambda$  электродвигателя большей мощности должно приближаться к  $\lambda_{\max}$ , но не превышать его; значение  $\lambda$  электродвигателя меньшей мощности не регламентируется. В отдельных случаях, например у тихоходных машин, значение  $\lambda_{\max}$  может быть увеличено по сравнению с рекомендуемыми в таблице 1.6 и 1.7, но с проверкой механической жесткости и прочности вала.

**Сердечник статора.** Сердечник собирают из отдельных отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм,

имеющих изоляционные покрытия для уменьшения потерь в стали от вихревых токов. Для сердечников рекомендуется применять следующие марки холоднокатаной изотропной электротехнической стали:

Высота оси вращения, мм	50 – 250	280 – 355	400 – 450
Марка стали	2013	2312	2411

Для стали 2013 обычно используют изолирование листов оксидированием (коэффициент заполнения стали  $k_c = 0,97$ ), для стали 2312 и 2411 – лакировкой ( $k_c = 0,95$ ) или термостойким электроизоляционным покрытием листов ( $k_c = 0,96 \div 0,97$ ).

Количество пазов сердечника статора

$$z_1 = 2pm_1q_1 \quad (1.5)$$

зависит от выбранного количества пазов на полюс и фазу

$$q_1 = z_1 / (2pm_1). \quad (1.6)$$

Обычно  $q_1$  выбирают равным целому числу. Только для унификации листов статора двигателей с разным количеством полюсов и для тихоходных двигателей иногда применяют дробное  $q_1$  (1,5; 2,5 и так далее). В таблице 1.8 приведены рекомендуемые значения  $q_1$ .

Таблица 1.8 – Рекомендуемые значения  $q_1$

$2p$	Количество пазов на полюс и фазу $q_1$ при различных значениях $h$ , мм		
	50 – 132	160 – 225	250 – 450
2	3; 4	5; 6	7; 8
4	2; 3	3; 4	4; 5
6	2; 3	3; 4	4; 5
8	1,5; 2	2; 3	3; 4
10	–	–	2; 3
12	–	–	2; 2,5

По выбранному значению  $q_1$  определяют  $z_1$  в соответствии с (1.5). При этом целесообразно использовать опыт по серии 4А (см. в таблице 1.12).

**Сердечник ротора.** Сердечник собирают из отдельных, отштампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Марки стали и изоляционные покрытия такие же, как в статоре.

В короткозамкнутом роторе применяют закрытые, полужакрытые и открытые пазы. Для уменьшения влияния моментов высших гармоник на пусковые и виброакустические характеристики машин роторы двигателей с высотами оси вращения  $h \leq 160$  мм имеют скос пазов  $b_{СК1}$  на одно зубцовое деление статора  $t_1$ ; при этом  $\beta_{СК1} = 1$ . Двигатели с большими высотами оси вращения обычно выполняют без скоса пазов.

Наружный диаметр сердечника ротора (мм)

$$D_{н2}=D_1 - 2\delta \quad (1.7)$$

где  $\delta$  – воздушный зазор между статором и ротором, мм.

Величину воздушного зазора выбирают с учетом противоречивых требований, так как, с одной стороны, при увеличении воздушного зазора уменьшается коэффициент мощности, а с другой – увеличиваются фактический КПД и надежность двигателя, снижается нагрев обмоток, уменьшаются добавочные потери, уровень шума и вибраций магнитного происхождения, возможность задевания ротора о статор.

В таблице 1.9 приведены средние значения воздушного зазора  $\delta$ , принятые в современных сериях асинхронных двигателей.

Таблица 1.9 – Средние значения воздушного зазора  $\delta$

$h$ , мм	$\delta$ (мм) при различных значениях $2p$			
	2	4	6 и 8	10 и 12
50	0,25	0,25	0,25	–
56	0,3	0,25	0,25	–
63	0,35	0,25	0,25	–
71, 80	0,35	0,25	0,25	–
90	0,4	0,25	0,25	–
100	0,45	0,3	0,3	–
112	0,5	0,3	0,3	–
132	0,6	0,35	0,35	–
160	0,8	0,5	0,5	–
180	1,0	0,6	0,45	–
200	1,0	0,7	0,5	–
225	1,0	0,85	0,6	–
250	1,2	1,0	0,7	–
280	1,3	1,0	0,8	0,7
315	1,5	1,0	0,9	0,8
355	1,8	1,2	1,0	0,9
400	2,0	1,4	1,2	1,0
450	2,0	1,4	1,2	1,0

Для высот осей вращения  $h \geq 71$  мм внутренний диаметр листов ротора

$$D_2 \approx 0,23D_{н1}; \quad (1.8)$$

для высот осей вращения  $h = 50$  и  $63$  мм.

$$D_2 \approx 0,19D_{н1} \quad (1.9)$$

После расчета вала на жесткость размер  $D_2$  уточняют.

Для улучшения охлаждения, уменьшения массы и динамического момента инерции ротора в сердечниках ротора с  $h \geq 250$  мм предусматривают круглые аксиальные вентиляционные каналы в соответствии с данными таблицы 1.10. У двигателей с меньшей высотой оси вращения аксиальные каналы обычно не предусматривают из-за повышения при этом магнитной индукции в спинке ротора.

**Таблица 1.10 – Количество  $n_{к2}$  и диаметр  $d_{к2}$  вентиляционных каналов**

$h$ , мм	Количество $n_{к2}$ и диаметр $d_{к2}$ (мм) вентиляционных каналов при различных значениях $2p$							
	2		4		6		8, 10 и 12	
	$n_{к2}$	$d_{к2}$	$n_{к2}$	$d_{к2}$	$n_{к2}$	$d_{к2}$	$n_{к2}$	$d_{к2}$
250	10	15	10	20	10	30	10	30
280	12	20	12	32	12	40	12	40
315	12	20	12	40	12	40	12	40
355	12	20	12	50	12	50	12	50
400	–	–	9	55	9	65	9	75
450	–	–	9	65	9	75	9	90

Длину сердечника ротора  $l_2$  принимают равной длине сердечника статора  $l_1$  для  $h \leq 250$  мм, а для  $h > 250$  мм  $l_2 = l_1 + 5$  мм. Радиальные вентиляционные каналы в роторе выполняют при  $l_2 > 350$  мм. Количество, размеры и расположение этих каналов в роторе такое же, как в сердечнике статора.

Количество пазов  $z_2$  для двигателей с короткозамкнутым ротором выбирают в зависимости от  $z_1$  и наличия скоса пазов в роторе.

В таблице 1.11 приведены рекомендуемые количества пазов  $z_2$ . Соотношения получены в результате теоретических и экспериментальных исследований. Отступление от рекомендованных соотношений  $z_1/z_2$  может привести к недопустимым провалам в характеристике пускового момента, к повышенным шумам и вибрациям.

**Таблица 1.11 – Рекомендуемые количества пазов  $z_2$**

$2p$	$z_1$	$z_2$	
		пазы без скоса	пазы со скосом
1	2	3	4
2	18	15, 21, 22	19, 22, 26, 28, 31, 33, 34, 35
	24	15, 17, 19, 32	19, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	20, 21, 23, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 28, 29, 43, 45, 47
	42	32, 34, 50, 52	–
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59

Продолжение таблицы 1.11

4	24	16, 17	16, 18, 28, 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 38, 44, 46	27, 28, 30, 34, 38, 45, 48
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	38, 40, 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
	48	36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, 70, 98, 100, 102, 104	–
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	108, 110	–
10	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104	99, 101, 103, 117, 123, 137
	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	86, 87, 93, 94
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112

Количество пазов в сердечнике ротора для АД с фазным ротором

$$z_2 = 2pm_2q_2 \quad (1.10)$$

зависит от выбранного количества пазов на полюс и фазу ротора  $q_2$ . Обычно (если это не оговорено в исходных данных) принимают  $m_2 = m_1$  и  $q_2 = q_1 \pm 1$ . Если при этом  $q_2$  получается слишком большим или малым, то принимают  $q_2 = q_1 \pm 0,5$ .

В таблице 1.12 приведены соотношения количества пазов  $z_1/z_2$ , принятые в серии 4А.

Таблица 1.12 – Соотношения количества пазов  $z_1/z_2$

h, мм	$z_1/z_2$ при различном $2p$					
	2	4	6	8	10	12
<b>Двигатели с короткозамкнутым ротором</b>						
50 – 63	24/19	24/18	36/28	–	–	–
71	24/19	24/18	36/28	36/28	–	–
80 – 110	24/19	36/28	36/28	36/28	–	–
112 – 132	24/19	36/34	54/51	48/44	–	–
160	36/28	48/38	54/51	48/44	–	–
180 – 200	36/28	48/38	72/58	72/58	–	–
225	36/28	48/38	72/56	72/56	–	–

Продолжение таблицы 1.12

250	48/40	60/50	72/56	72/56	—	—
280 – 355	48/38	60/70	72/82	72/86	90/106	90/106
400 – 450	—	60/70	72/84	72/86	90/106	90/106
<b>Двигатели с фазным ротором</b>						
200	—	48/36	72/54	72/48	—	—
225	—	48/66	72/81	72/84	—	—
250	—	60/72	72/81	72/84	—	—
280 – 355	—	60/72	72/81	72/84	90/120	90/108
400 – 450	—	60/72	72/90	72/96	90/120	90/126

**Пример расчета.** Магнитная цепь двигателя. Размеры, материал

№ пункта	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1	Двигатель №2
<b>Главные размеры</b>				
1	изоляция класса нагревостойкости	§ 1.2 стр.5	$B$	$F$
2	$h$ , мм	таблица 1.1	132 —	— 315
3	$D_{н1}$ , мм	таблица 1.2	233	590
4	$D_1$ , мм	таблица 1.3	$0,68 \cdot 233 - 5 = 153$	$0,72 \cdot 590 - 3 = 424$
5	$k_n$	рисунок 1.1	0,97	0,98
6	$\eta'$ , о. е.	рисунок 1.2, $a$	0,87	—
7	$\eta'$ , о. е.	рисунок 1.2, $b$	—	$0,935 - 0,005 = 0,93$
8	$\cos \varphi'$ ,	рисунок 1.3, $a$	0,86	—
9	о. е.	рисунок 1.3, $b$	—	$0,89 - 0,01 = 0,88$
10	$P'$ , Вт	$k_n P_2 / (\eta \cos \varphi)$	$0,97 \frac{7,5 \cdot 10^3}{0,87 \cdot 0,86} = 9723$	$0,98 \frac{160 \cdot 10^3}{0,93 \cdot 0,88} = 191600$
11	$A'_1$ , А/см	рисунок 1.4, $a$ и таблица 1.5	$296 \cdot 0,86 = 255$	$565 \cdot 0,89 = 503$
12	$B'_\delta$ , Тл	рисунок 1.4, $b$ и таблица 1.5	0,885	$0,858 \cdot 1,02 = 0,875$
13	$k'_{об1}$	§ 1.2	0,94	0,93



Продолжение таблицы 1.12

14	$l'_1, \text{мм}$	(1.3)	$\frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot 9723}{153^2 \cdot 1500255} \times$ $\times \frac{1}{0,885 \cdot 0,94} = 112,5$	$\frac{8,62 \cdot 10^7 \cdot 191600}{424^2 \cdot 1000 \cdot 503} \times$ $\frac{1}{0,875 \cdot 0,93} = 226,6$
5	$l_1, \text{мм}$	§ 1.2	115	225
16	$\lambda$	(1.4)	$115 / 153 = 0,75$	$225/424=0,53$
17	$\lambda_{\text{max}}$	таблица 1.6 и 1.7	$1,46 - 0,00071 \times$ $\times 233 = 1,3$	$1,05 (1,33 -$ $- 0,00087 \cdot 590)$ $= 0,86$
<b>Сердечник статора</b>				
18	марка стали		2013	2312
19	толщина стали, мм		0,5	0,5
20	изоли-ровка		оксидирование	лакировка
21	$k_c$	§ 1.3	0,97	0,95
22	$q_1$	таблица 1.8 и 1.6	3	4
23	$z_1$	(1.5)	$4 \cdot 3 \cdot 3 = 36$	$6 \cdot 3 \cdot 4 = 72$
<b>Сердечник ротора</b>				
24	марка стали		2013	2312
25	толщина стали, мм		0,5	0,5
26	изоли-ровка		оксидирование	лакировка
27	$k_c$	§ 1.3	0,97	0,95
28	$\beta_{\text{ск}}$	§ 1.3	1,0	—
29	$\delta, \text{мм}$	таблица 1.9	0,35	0,9
30	$D_{\text{н}2}, \text{мм}$	(1.7)	$153 - 2 \cdot 0,35 = 152,3$	$422 - 2 \cdot 0,9 =$ $= 420,2$
31	$D_2, \text{мм}$	(1.8)	$0,23 \cdot 233 = 54$	$0,23 \cdot 590 = 140$
32	$n_{\text{к}2}$	таблица 1.10	—	12
33	$d_{\text{к}2}, \text{мм}$	таблица 1.10	—	40
34	$l_2, \text{мм}$	§ 1.3	115	$225 + 5 = 230$
35	$q_2, \text{мм}$	§ 1.3	—	$4 + 0,5 = 4,5$
36	$z_2$	таблица 1.11 и (1.10)	34	$6 \cdot 3 \cdot 4,5 = 81$

## 1.4 Обмотка статора

**Типы обмоток и общие положения.** В асинхронных двигателях с  $h \leq 160$  мм обычно выполняют однослойные всыпанные обмотки, а в двигателях с  $h > 160$  мм – двухслойные (из мягких секций или из жестких катушек). В таблице 1.4 указаны типы используемых обмоток и соответственно форма пазов. При выполнении двигателей с однослойными обмотками облегчается применение автоматических обмоточных станков, а при изготовлении их с двухслойными обмотками с укороченным шагом – улучшается форма кривой поля и уменьшается расход меди на лобовые части обмотки. Однослойную обмотку выполняют концентрической. Для механизации обмоточных работ в электродвигателях с  $h > 160$  мм используют разносекционные одно- и двухслойные концентрические обмотки.

Высоковольтные электродвигатели выполняют с открытыми пазами. По высоте паза укладывают две катушки, а прямоугольные проводники располагают плашмя. Конструкция обмоток статора описана в [1].

На рисунке 1.5 показаны схема трехфазной однослойной концентрической обмотки статора, а на рисунке 1.6 – схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора. Обычно обмотку статора выполняют шестизонной; каждая зона равна 60 эл. град.

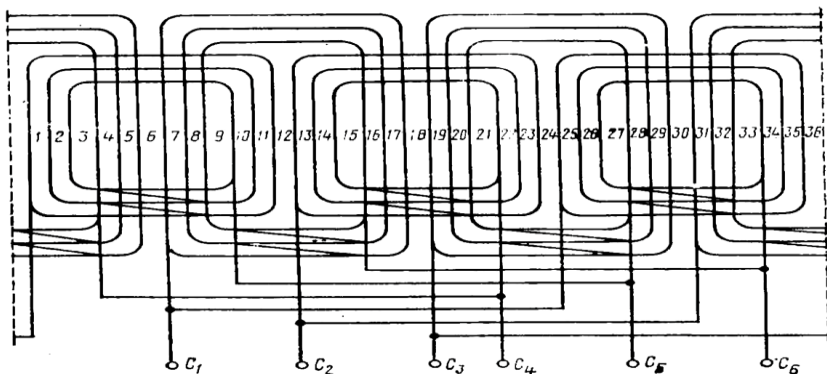


Рисунок 1.5 – Схема трехфазной однослойной концентрической обмотки статора  
 $z_1=36$ ;  $2p=4$ ;  $q_1=3$ ;  $y_{n1}=7, 9, 11$

При шестизонной обмотке коэффициент распределения

$$k_{p1} = 0,5 / [q_1 \sin(\alpha / 2)], \quad (1.11)$$

где  $\alpha=60^\circ/q_1$ .

Однослойную обмотку выполняют с диаметральной шагом по пазам

$$y_{n1} = z_1 / (2p). \quad (1.12)$$

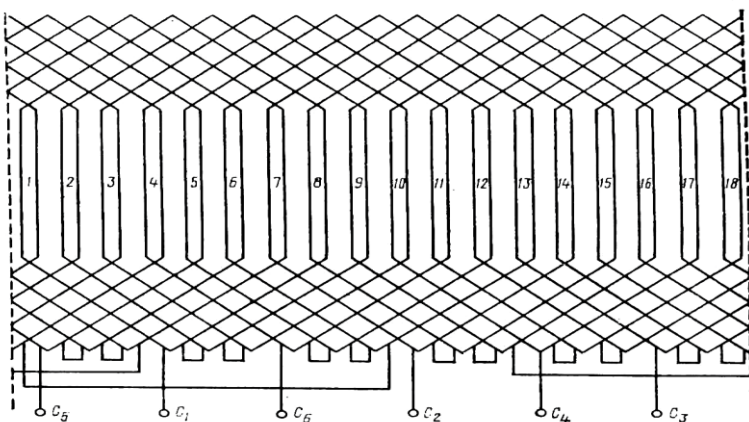


Рисунок 1.6 – Схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора  
 $z_1=18; 2p=2; q_1=3; y_{n1}=7$

Двухслойную обмотку выполняют с укороченным шагом

$$y_{n1} = \beta_1 z_1 / (2p). \quad (1.13)$$

Укорочение шага  $\beta_1$  выбирают таким образом, чтобы  $y_{n1}$  равнялось целому числу, а  $\beta_1 \approx 0,6$  при  $2p = 2$  или  $\beta_1 \approx 0,8$  при  $2p \geq 4$ .

Коэффициент укорочения

$$k_{y1} = \sin(\beta_1 \cdot 90^\circ). \quad (1.14)$$

При однослойной обмотке с диаметральной шагом  $\beta_1=1$ .

Обмоточный коэффициент

$$k_{obl} = k_{p1} k_{y1}. \quad (1.15)$$

Предварительное значение магнитного потока (Вб)

$$\Phi' = B'_s D_1 l'_1 10^{-6} / p, \quad (1.16)$$

где  $l'_1$  – округленное значение расчетной длины сердечника статора; при отсутствии радиальных вентиляционных каналов  $l'_1$  принимается равным  $l_1$ .

Предварительное количество витков в обмотке фазы

$$w'_1 = k_n U_1 / [222 k_{obl} (f_1 / 50) \Phi']. \quad (1.17)$$

Предварительное количество эффективных проводников в пазу

$$N'_{n1} = w'_1 a_1 / (p q_1), \quad (1.18)$$

где  $a_1$  – количество параллельных ветвей обмотки статора, которое должно быть одним из делителей числа полюсов, например при  $2p = 12$  возможны значения  $a_1=1; 2; 3; 4; 6$ .

Параллельные ветви обмотки должны содержать одинаковое количество витков, а стороны катушек – находиться в магнитном поле в одинаковых условиях. При малом значении  $N_{\text{п1}}$  и вызванных этим трудностях с расположением проводов в пазу увеличение значения  $a_1$  позволяет соответственно повысить  $N_{\text{п1}}$ . Полученное из (1.18)  $N'_{\text{п1}}$  округляют до ближайшего целого числа  $N_{\text{п1}}$ . При двухслойной обмотке  $N_{\text{п1}}$  должно быть выбрано, как правило четным. Однако при малых значениях  $N_{\text{п1}}$ , например  $N_{\text{п1}} = 6; 8$ , иногда приходится выбирать  $N_{\text{п1}}$  нечетным. При этом катушки имеют разное количество проводников, отличающееся на единицу. Применяя обмотки с разновитковыми катушками, следует обращать внимание на необходимость образования симметричных параллельных ветвей.

Выбрав целое число  $N_{\text{п1}}$ , уточняют предварительно установленные параметры  $w'_1, A'_1$  и  $B'_\delta$ :

$$w_1 = N_{\text{п1}} p q_1 / a_1. \quad (1.19)$$

Уточненное значение магнитного потока (Вб)

$$\Phi = \Phi' w'_1 / w_1. \quad (1.20)$$

Уточненное значение индукции в воздушном зазоре (Тл)

$$B_\delta = B'_\delta w'_1 / w_1 \quad (1.21)$$

Предварительное значение номинального фазного тока (А)

$$I_1 = P_2 \cdot 10^3 / (3 U_1 \eta' \cos \varphi'). \quad (1.22)$$

Уточненная линейная нагрузка статора (А/см)

$$A_1 = 10 N_{\text{п1}} z_1 I_1 / (\pi D_1 a_1). \quad (1.23)$$

Полученное по (1.21) значение  $A_1$  не должно отличаться от предварительно принятого  $A'_1$  более чем на 10%; иначе следует изменить количество витков  $w_1$ .

Проектирование обмотки ведут при одновременном определении размеров зубцовой зоны. Для определения высоты паза сначала находят высоту спинки статора  $h_{c1}$ . Средние значения магнитной индукции в спинке статора  $B_{c1}$  приведены в таблице 1.13.

Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора (мм)

$$t_1 = \pi D_1 / z_1. \quad (1.24)$$

**Обмотка статора с трапецидальными полужакрытыми пазами.**

Полужакрытые пазы статора обычно имеют трапецидальную форму (рисунок 1.7), при этом размеры  $b_1$  и  $b_2$  выбирают такими, чтобы стенки зубцов были параллельными ( $b_{z1} = \text{const}$ ). Постоянство магнитной индукции по высоте зуба уменьшает МДС на участке зубца. Кроме того,

Таблица 1.13 – Средние значения магнитной индукции в спинке статора  $B_{c1}$

$h$ , мм	$2p$	$B_{c1}$ , Тл
50 – 250	2; 4	1,55 – 1,75
	6	1,4 – 1,6
	8	1,1 – 1,3
280 – 355	2; 4; 6; 8	1,45 – 1,65
	10; 12	1,2 – 1,4
400 – 450	4; 6; 8	1,3 – 1,5
	10; 12	1,1 – 1,3

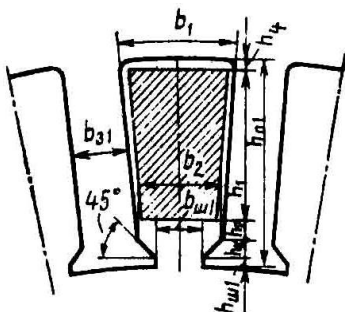


Рисунок 1.7 – Трапецеидальный

при полузакрытых пазах коэффициент воздушного зазора и добавочные потери меньше, чем при открытых пазах или полуоткрытых.

Недостаток полузакрытых трапецеидальных пазов заключается в том, что в них укладывают всыпную обмотку из круглого провода. Это понижает коэффициент заполнения паза и надежность обмотки. Для определения ширины зубца  $b_{31}$  следует принять средние значения магнитной индукции в зубцах статора  $B_{31}$  по таблице 1.14.

Таблица 1.14 – Средние значения магнитной индукции в зубцах статора  $B_{31}$

$h$ , мм	$2p$	$B_{31}$ для двигателей со степенью защиты, Тл	
		IP44	IP23
50 – 132	2; 4; 6; 8	1,75 – 1,95	1,8 – 2,0
160 – 250	2	1,75 – 1,95	1,9 – 2,1
	4; 6; 8	1,6 – 1,8	1,7 – 1,9
280 – 315	10; 12	1,6 – 1,8	1,7 – 1,9

Ширина зубца (мм)

$$b_{31} = t_1 B_{\delta} / (k_c B_{31}) . \quad (1.25)$$

При сборке сердечника размеры пазов в штампе и в свету (после сборки сердечника) не совпадают из-за неизбежного смещения листов друг относительно друга. Припуски на сборку сердечников статора и ротора электродвигателей с  $h = 50 \div 132$  мм по ширине  $b_c$  и по высоте  $h_c$

составляют 0,1 мм;  $h_c = 160 \div 250$  мм  $b_c$  и  $h_c = 0,2$  мм; с  $h = 280 \div 355$  мм  $b_c$  и  $h_c = 0,3$  мм; с  $h = 400 \div 450$  мм  $b_c$  и  $h_c = 0,4$  мм.

Размеры трапецидальных пазов определяют в последовательности, приведенной в таблице 1.15:

**Таблица 1.15 – Формулы для расчета размеров трапецидальных пазов**

Высота спинки статора (мм)	$h_{c1} = \Phi \cdot 10^6 / (2k_c l_1 B_{c1})$				(1.26)
Высота паза (мм)	$h_{n1} = [(D_{n1} - D_1) / 2] - h_{c1}$				(1.27)
Большая ширина паза (мм)	$b_1 = [\pi(D_1 + 2h_{n1}) / z_1] - b_{z1}$				(1.28)
Меньшая ширина паза (мм)	$b_2 = \frac{\pi(D_1 + 2h_{n1} - b_{n1}) - z_1 b_{z1}}{z_1 - \pi}$				(1.29)
Проверка правильности определения $b_1$ и $b_2$ исходя из требования $b_{z1} = \text{const}$	$z_1(b_1 - b_2) + \pi(b_2 - b_{n1}) - 2\pi(h_{n1} - h_{n1}) \approx 0$				(1.30)
Площадь поперечного сечения паза в штампе (мм <sup>2</sup> )	$S_{n1} = \frac{b_1 + b_2}{2} \times \left( h_{n1} - h_{n1} - \frac{b_2 - b_{n1}}{2} \right)$				(1.31)
Площадь поперечного сечения паза в свету (мм <sup>2</sup> )	$S'_{n1} = \left( \frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) \times \left( h_{n1} - h_{n1} - \frac{b_2 - b_{n1}}{2} - h_c \right)$				(1.32)
Площадь поперечного сечения корпусной изоляции (мм <sup>2</sup> )	$S_n = b_{n1}(2h_{n1} + b_1 + b_2)$				(1.33)
Площадь поперечного сечения прокладок между верхней и нижней катушками в пазу, на дне паза и под клином (мм <sup>2</sup> )	$S_{np} = 0,5b_1 + 0,75b_2$				(1.34)
Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой (мм <sup>2</sup> )	$S''_{n1} = S'_{n1} - S_n - S_{np}$				(1.35)
<b>Среднее значение односторонней толщины корпусной изоляции</b>					
$h$ , мм	50 – 80	90 – 132	160 – 250	280 – 315	
$b_{n1}$	0,2	0,25	0,4	0,58	

Примечание –  $h_{n1} = 0,5$  мм – высота шлица;  $b_{n1}$  – ширина шлица, мм;  $b_{n1}$  – среднее значение односторонней толщины корпусной изоляции.

Предварительное значение ширины шлица

$$b'_{n1} \approx 0,3\sqrt{h}. \quad (1.36)$$

После выбора диаметра изолированного обмоточного провода  $d'$  определяют значение  $b''_{ш1}$  по (1.40) и вносят при необходимости коррективы в расчеты по формулам (1.36) – (1.39).

Для обмоток статора применяют провода марки ПЭТВ (класс нагревостойкости В), провода ПЭТ-155 (класс F) и ПЭТ-200 (класс H). При механизации обмоточных работ применяют провода с механически более прочной изоляцией марок ПЭТВМ, ПЭТМ-155 и ПЭТМ-200 соответственно.

Диаметр провода выбирают таким, чтобы коэффициент заполнения паза  $k_n$  не превышал 0,75 (при ручной укладке) и 0,72 (при машинной на статорообмоточных станках). Коэффициент заполнения паза

$$k_n = N_{ш1} c (d')^2 / S''_{ш1}, \quad (1.37)$$

где  $c$  – количество элементарных проводов в эффективном;  $d'$  – диаметр элементарного изолированного провода, мм.

Задаввшись  $k_n$ , определяют произведение

$$c (d')^2 = k_n S''_{ш1} / N_{ш1}. \quad (1.38)$$

Число  $c$  выбирают, исходя из условия, чтобы диаметр провода с изоляцией  $d'$  не превышал 1,71 мм при ручной укладке и 1,33 при машинной. Причина этого ограничения заключается в затруднении с укладкой проводов большего диаметра в пазы.

При значениях  $k_n$ , больших допустимого, увеличиваются механические воздействия при укладке обмотки в пазы и в связи с этим возрастает опасность повреждения изоляции проводов при укладке. При значениях  $k_n < 0,65$  в связи с повышением плотности тока в пазу увеличивается температура обмотки. Это может привести к необходимости удлинения сердечников статора и ротора. Кроме того, для уплотнения обмотки в пазу потребуются утолщенные клинья.

Из (1.35) диаметр элементарного изолированного провода (мм)

$$d' = \sqrt{k_n S''_{ш1} / (N_{ш1} c)}. \quad (1.39)$$

По приложению А (таблица А.1) находим ближайший стандартизованный диаметр  $d'$ , соответствующий ему диаметр неизолированного провода  $d$  и площадь поперечного сечения  $S$ . После этого уточняют коэффициент заполнения паза по (1.37) и ширину шлица (мм)

$$b''_{ш1} = d' + 2b_n + 0,4. \quad (1.40)$$

Если окажется, что  $b'_{ш1} > b''_{ш1}$ , то принимают  $b_{ш1} = b'_{ш1}$ ; если  $b'_{ш1} < b''_{ш1}$ , то принимают  $b_{ш1} = b''_{ш1}$ .

Плотность тока в обмотке статора (А/мм<sup>2</sup>)

$$J_1 = I_1 / (c S a_1). \quad (1.41)$$

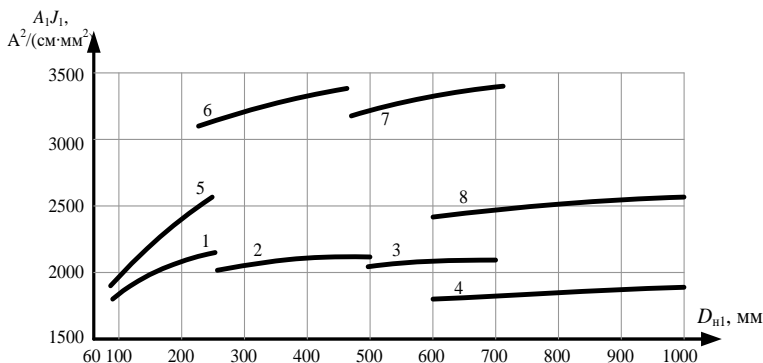


Рисунок 1.8 – Средние допустимые значения  $A_1J_1=f(D_{н1})$  при классе нагревостойкости F и  $2p=4$ ;

1 – исполнение по защите – IP44, способ охлаждения IC0141, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; 2 – то же, что 1, но двухслойная обмотка; 3 – IP44, IC0141, полуоткрытые пазы, двухслойная обмотка, продуваемый ротор; 4 – IP44; IC0161, открытые пазы, U=6000 В, двухслойная обмотка; 5 – IP23, IC01, полузакрытые пазы, однослойная обмотка; 6 – то же, что 5, но двухслойная обмотка; 7 – IP23, IC01, полуоткрытые пазы, двухслойная обмотка; 8 – IP23, IC01, открытые пазы, U=6000 В, двухслойная обмотка

Уровень удельной тепловой нагрузки статора от потерь в обмотке в значительной мере определяет ожидаемое превышение температуры обмотки; как показано в [1], этот уровень характеризуется произведением линейной нагрузки на плотность тока в обмотке  $A_1J_1$ .

У проектируемой обмотки статора находят указанное произведение и сравнивают его со средним допускаемым значением из рис 1.8, соответствующим исполнению с изоляцией класса нагревостойкости F и с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. При изоляции классов нагревостойкости B и H, а также при частотах вращения, отличающихся от 1500 об/мин, принимаемое из рисунка значение  $(A_1J_1)_{\text{доп}}$  умножают на коэффициент 0,75 (для класса B) или на 1,3 (для класса H) и на коэффициент  $k_5$  (таблица 1.16), учитывающий изменение эффекта охлаждения обмотки и влияния его на  $(A_1J_1)_{\text{доп}}$  при различных частотах вращения.

Таблица 1.16 – Коэффициент  $k_5$

Степень защиты	$D_{н1}$ , мм	Коэффициент $k_5$ для различных значений $2p$				
		2	4	6	8	10 и 12
IP44	80 – 240	0,78	1,0	1,0	1,0	–
	280 – 500	1,0	1,0	1,0	1,0	–
	520 – 660	1,0	1,0	0,87	0,87	0,84
	740 – 990	–	1,0	0,89	0,83	0,77
IP23	280 – 500	1,07	1,0	0,89	0,84	–



	520 – 660	1,0	1,0	0,86	0,75	0,66
	740 – 990	–	1,0	0,89	0,83	0,79

Если полученный при расчете двигателя показатель  $A_1 J_1$  превышает допускаемое значение более чем на 15%, то следует либо повысить площади поперечных сечений провода и паза  $S''_{п1}$ , для чего необходимо уменьшить размеры  $h_{c1}$  и  $b_{з1}$ , с учетом того, чтобы  $B_{c1}$  и  $B_{з1}$ , не превышали допускаемых значений, либо удлинить сердечники статора и ротора. При этом увеличится магнитный поток  $\Phi$  и уменьшится количество проводников в пазу. Размеры элементов обмотки определяют в последовательности, приведенной в таблице 1.17.

Таблица 1.17 – Формулы для расчета размеров элементов обмотки

Среднее зубцовое деление статора	$t_{cp1} = \pi(D_1 + h_{п1}) / z_1$	(1.42)
Средняя ширина катушки обмотки статора	$b_{cp1} = t_{cp1} y_{п1}$	(1.43)
Средняя длина одной лобовой части катушки	$l_{л1} = (1,16 + 0,14 p) b_{cp1} + 15$	(1.44)
Средняя длина витка обмотки	$l_{cp1} = 2(l_1 + l_{л1})$	(1.45)
Длина вылета лобовой части обмотки (мм):		
при $h \leq 132$ мм	$l_{B1} = (0,19 + 0,1 p) b_{cp1} + 10$	(1.46)
при $h \geq 160$ мм	$l_{B1} = (0,12 + 0,15 p) b_{cp1} + 10$	

Конструкция изоляции обмотки статора из круглых проводников, расположенных в трапециевидных полужакрытых пазах, приведена в приложении А (таблицы А.14 и А.16)

**Обмотка статора с прямоугольными полуоткрытыми и открытыми пазами.** Достоинством прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов статора (рисунок 1.9) является возможность размещения в них проводов прямоугольного поперечного сечения, что повышает коэффициент заполнения пазов медью, а также надежность обмотки.

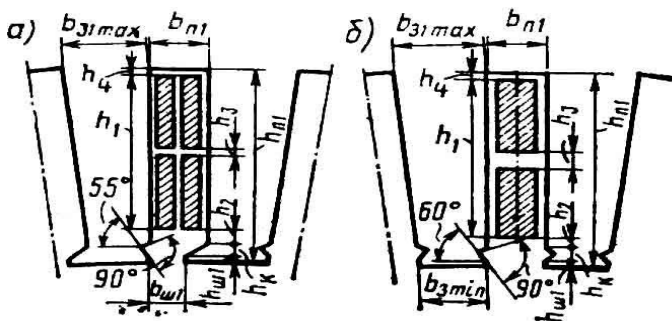


Рисунок 1.9 – Прямоугольные пазы статора: полуоткрытые (а) и открытые (б)

Для определения предварительной ширины зубца в наиболее узком месте  $b'_{31min}$  следует принять предварительное значение магнитной индукции в этой части зубца  $B'_{31max}$  по таблице 1.18.

Таблица 1.18 – Предварительное значение магнитной индукции  $B'_{31max}$

Форма пазов	$2p$	$B'_{31max}$ (Тл) для двигателей со степенью защиты	
		IP44	IP23
Полуоткрытые	2	1,75 – 1,95	1,9 – 2,1
	4 – 12	1,6 – 1,8	1,7 – 1,9
Открытые	2	1,7 – 1,9	1,8 – 2,0
	4 – 12	1,6 – 1,8	1,7 – 1,9

Примечание – Уточненные при дальнейших расчетах значения  $B'_{31max}$  не должны превышать указанные в таблице более чем на 10%.

Рекомендуется применять следующие марки проводов прямоугольного сечения: для класса  $B$  – ПЭТВП (при  $U \leq 660$  В) и ПЭТВСД (при  $U = 6000$  В); для класса  $F$  – ПЭТП-155; для класса  $H$  – ПЭТП-200.

Выбор размеров прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов и расположенных в них проводов производят в последовательности, приведенной в таблице 1.19.

Таблица 1.19 – Формулы для расчета прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов

Предварительное значение магнитной индукции в наиболее узком месте зубца статора (Тл)	$B'_{31max}$ – из таблицы 1.17	
Зубцовое деление статора в наиболее узком месте (мм) (для полуоткрытых пазов)	$t_{1min} = \pi(D_1 + 2h_{n1} + 2h_k)z_1$	(1.47)

Предварительная ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{31\min} = t_{1\min} B_{\sigma} / (k_c B'_{31\max})$	(1.48)
Предварительная ширина полуоткрытого и открытого паза в штампе (мм)	$b'_{п1} = t_{1\min} - b'_{31\min}$	(1.49)
Ширина шлица полуоткрытого паза (мм)	$b_{ш1} \approx 0,6b'_{п1}$	(1.50)
Количество эффективных проводников по ширине паза	При полуоткрытых пазах и четном $N_{п1}$ принимаем $N_{ш} = 2$ . При нечетном $N_{п1} - N_{ш} = 1$ ; при этом количество элементарных проводников должно быть четным и $c \geq 2$ . При открытых пазах $N_{ш} = 1; 2$ .	
Допустимая ширина эффективного проводника с витковой изоляцией (мм)	$b'_{эф} = (b'_{п1} - 2b_{ш1} - b_c) / N_{ш}$	(1.51)

Продолжение таблицы 1.19

Количество эффективных проводников по высоте паза	$N_B = N_{п1} / N_{ш}$	(1.52)
Предварительная высота спинки статора (мм)	$h'_{c1}$ – по (1.26)	
Предварительная высота паза (мм)	$h'_{п1}$ – по (1.27)	
Допустимая высота эффективного проводника с витковой изоляцией (мм)	$h'_{эф} = (h_{п1} - h_{п1} - h_{к} - h_{ш1} - h_c) / N_B$	(1.53)
Площадь эффективного проводника (мм <sup>2</sup> )	$S'_{эф} = h'_{эф} b'_{эф}$	(1.54)

Здесь  $h_{п1}$ ,  $2b_{п1}$  – общая толщина изоляции по высоте и ширине паза (таблица 1.20);  $h_c$ ,  $b_c$  – припуски на сборку сердечника по высоте и ширине составляют для  $h \leq 355$  мм:  $h_c$  и  $b_c = 0,3$ , а для  $h \geq 400$  мм:  $h_c$  и  $b_c = 0,35$ ; высота шлица  $h_{ш1} = 1,0$  мм, высота клина  $h_k = 3,0 \div 3,5$  мм.

Таблица 1.20 – Припуски на сборку сердечника по высоте и ширине

$h$ , мм	Форма паза	$h_{п1}$ , мм	$2b_{п1}$ , мм
280 – 355	Полуоткрытые	4,5	2,2
280 – 355	Открытые	4,5	1,8
400 – 450	»	12,4	4,1

*Примечание* – Значения  $h_{п1}$  и  $2b_{п1}$  учитывают технологические зазоры на укладку обмотки и толщину всех изоляционных прокладок, но не учитывают толщину витковой изоляции и высоту клина;  $b_{п1}$  – односторонняя толщина корпунной изоляции,  $2b_{п1}$  – двусторонняя.

Для определения количества элементарных проводов в одном эффективном можно исходить из наибольшей допустимой по технологическим соображениям площади и ширины элементарного проводника. Для полуоткрытых пазов: площадь элементарного провода  $S_{доп} \leq 10$  мм<sup>2</sup>, ширина  $b_{доп} \leq 4,7$  мм; для открытых пазов  $S_{доп} \leq 18$  мм<sup>2</sup>,  $b_{доп} \leq 7,4$  мм.

Для уменьшения добавочных потерь от вихревых токов, наводимых потоком рассеяния, прямоугольные проводники располагают в пазу статора плашмя, т. е. большей стороной по ширине паза. При этом высота эффективного проводника  $a_{эф}^*$  ограничена (для низковольтных машин  $a_{эф} \leq 2,12$  мм, для высоковольтных  $a_{эф} \leq 2,5$ ). Если высота (меньшая сторона эффективного проводника) получается больше

---

\*Здесь и далее для прямоугольных проводников принимаются в соответствии с ГОСТ 434 на обмоточные провода обозначения меньшего размера «а» и большего «b».

указанной, то эффективный проводник по высоте также подразделяют на элементарные. Предварительно количество элементарных проводников определяют делением  $S_{\text{эф}}$  на  $S_{\text{доп}}$  с округлением до ближайшего большего целого числа  $c'$ .

Количество элементарных проводников в одном эффективном по ширине определяют делением полученной ширины эффективного проводника  $b'_{\text{эф}}$  на  $b_{\text{доп}}$  с округлением до ближайшего большего целого числа  $c_b$ . Разделив  $c'$  на  $c_b$ , получим предварительно количество элементарных проводников в одном эффективном по высоте паза  $c'_a$ . Разделив  $a'_{\text{эф}}$  на  $c'_a$ , определяют размер элементарного проводника по высоте паза. Если он превысит 2,12 мм (для низковольтных машин) или 2,5 (для высоковольтных), то количество элементарных проводников по высоте паза следует увеличить. Получают окончательное количество элементарных проводников по высоте паза  $c_a$  и общее их количество  $c = c_a c_b$ .

Меньший  $a'$  и больший  $b'$  размеры неизолированного элементарного провода

$$a' = (a'_{\text{эф}} / c_a) - \Delta_{\text{и}}; \quad (1.55)$$

$$b' = (b'_{\text{эф}} / c_b) - \Delta_{\text{и}}, \quad (1.56)$$

где  $\Delta_{\text{и}}$  – двусторонняя толщина изоляции провода, мм (приложение А (таблица А.3)).

По приложению А (таблица А.2) находят ближайший стандартизованный элементарный неизолированный провод с размерами  $a$  и  $b$ , близкими к вычисленным по (1.55) и (1.56), и площадь его поперечного сечения  $S$ .

Размер по высоте паза в штампе (мм)

$$h_{\text{п1}} = N_{\text{в}} c_a (a + \Delta_{\text{и}}) + h_{\text{и1}} + h_{\text{с}} + h_{\text{ш1}} + h_{\text{к}}. \quad (1.57)$$

Размер по ширине паза в штампе (мм)

$$b_{\text{п1}} = N_{\text{ш}} c_b (b + \Delta_{\text{и}}) + 2b_{\text{и1}} + b_{\text{с}}. \quad (1.58)$$

Уточненная ширина зубца в наиболее узкой части (мм)

$$b_{\text{з1min}} = t_{\text{1min}} - b_{\text{п1}}. \quad (1.59)$$

Уточненная магнитная индукция в наиболее узкой части зубца статора (Тл)

$$B_{\text{з1max}} = t_1 B_{\delta} / (b_{\text{з1min}} k_{\text{с}}). \quad (1.60)$$

Плотность тока в обмотке статора  $J_1$  определяют по (1.41), а  $h_{\text{с1}}$  – по (1.26). Далее находят удельную тепловую нагрузку от потерь в обмотке  $A_1 J_1$  и сравнивают ее со средним допускаемым значением из рисунка 1.8. При классах нагревостойкости  $B$  и  $H$ , а также при частотах вращения, отличающихся от 1500 об/мин, принимаемое из рисунка 1.8 значение

$(A_1J_1)_{\text{доп}}$  должно быть умножено на поправочные коэффициенты, как это было рекомендовано для трапецидальных пазов. Если полученный при расчете двигателя показатель  $A_1J_1$  превышает допускаемое значение более чем на 15%, то следует поступить так, как было рекомендовано для трапецидальных пазов. Размеры обмотки определяют в последовательности, приведенной в таблице 1.21.

**Таблица 1.21 – Формулы для расчета размеров обмотки**

Среднее зубцовое деление статора (мм)	$t_{cp1}$ – по (1.42)	
Средняя ширина катушки обмотки (мм)	$b_{cp1}$ – по (1.43)	
Средняя длина одной лобовой части обмотки (мм)		
при $U \leq 660$ В	$l_{n1} = 1,3b_{cp1} + h_{n1} + 50$	(1.61)
при $U = 6000$ В	$l_{n1} = 1,2b_{cp1} + h_{n1} + 90$	
Средняя длина витка обмотки (мм)	$l_{cp1}$ – по (1.45)	
Длина вылета лобовой части обмотки (мм) при $U \leq 660$ В	$l_{B1} = 0,4b_{cp1} + h_{n1} / 2 + 25$	(1.62)
То же, при $U = 6000$ В	$l_{B1} = 0,35b_{cp1} + h_{n1} / 2 + 45$	(1.63)

Конструкция изоляции обмотки статора из прямоугольного провода, расположенного в полуоткрытых или в открытых пазах, приведена в приложении А (таблица А.17, А.18, А.21).

**Примеры расчета машин.** Для двигателя №1 принимаем однослойную выпinnую концентрическую обмотку (таблица 1.4) из провода марки ПЭТВ (класс нагревостойкости  $B$ ), укладываемую в трапецидальные полузакрытые пазы (рисунок 1.7). Для двигателя №2 принимаем двухслойную обмотку из жестких катушек (таблица 1.4), выполняемую проводом ПЭТП-155 (класс нагревостойкости  $F$ ), укладываемую в прямоугольные полуоткрытые пазы (рисунок 1.9). Пример расчета обмотки статора для двигателя №1 и №2 приведен в таблице 1.22.

**Таблица 1.22 – Пример расчета обмотки статора**

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1	Двигатель №2
37	$k_{p1}$	(1.11)	$0,5 / [3\sin(60 / (3 \cdot 2))] = 0,96$	$0,5 / [4\sin(60 / (4 \cdot 2))] = 0,959$
38	$\beta_1$ , о. е.	§ 1.4	1	0,75
39	$u_{n1}$ , р. паз $u_{n1}$ , р. паз	(1.12) (1.13)	$36 / 4 = 9$	$0,75 \cdot 72 / 6 = 9$
40	$k_{y1}$	(1.14)	1	$(0,75 \cdot 90^0) = 0,924$
41	$k_{об1}$	(1.15)	$0,96 \cdot 1 = 0,96$	$0,959 \cdot 0,924 = 0,886$

42	$\Phi', B\delta$	(1.16)	$0,885 \cdot 153 \cdot 115 \cdot 10^{-6} / 2 = 0,0078$	$0,875 \cdot 422 \cdot 225 \cdot 10^{-6} / 3 = 0,0277$
----	------------------	--------	--	--

Продолжение таблицы 1.22

43	$\omega_1$	(1.17)	$\frac{0,97 \cdot 220}{222 \cdot 0,96(50/50)} \frac{1}{0,0078} = 128$	$\frac{0,98 \cdot 380}{222 \cdot 0,886 \cdot 0,0277} = 68$
44	$a_1$	§ 1.4	1	3
45	$N'_{\text{п1}}$	(1.18)	$128 \cdot 1 / (2 \cdot 3) = 21,3$	$68 \cdot 3 / (3 \cdot 4) = 17$
46	$N_{\text{п1}}$	§ 1.4	21	$8 + 9 = 17$
47	$\omega_1$	(1.19)	$21 \cdot 2 \cdot 3 / 1 = 126$	$17 \cdot 3 \cdot 4 / 3 = 68$
48	$\Phi, \text{Вб}$	(1.20)	$0,0078 \cdot 128 / 126 = 0,0079$	$0,0277 \cdot 68 / 68 = 0,0227$
49	$B_{\delta}, \text{Тл}$	(1.21)	$0,885 \cdot 128 / 126 = 0,9$	$0,875 \cdot 68 / 68 = 0,875$
50	$I_1, \text{А}$	(1.22)	$7,5 \cdot 10^3 / (3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,86) =$ $= 15,2$	$160 \cdot 10^3 /$ $/(3 \cdot 380 \cdot 0,93 \cdot 0,88) =$ $= 171,5$
51	$A_1, \text{А/см}$	(1.23)	$\frac{10 \cdot 21 \cdot 36 \cdot 15,2}{\pi \cdot 153 \cdot 1} = 239$	$\frac{10 \cdot 17 \cdot 72 \cdot 171,5}{\pi \cdot 422 \cdot 3} = 528$
52	$B_{\text{с1}}, \text{Тл}$	таблица 1.13	1,65	1,55
53	$t_1, \text{мм}$	(1.24)	$\pi \cdot 153 / 36 = 13,3$	$\pi \cdot 422 / 72 = 18,4$
<b>Обмотка статора с трапецидальными полузакрытыми пазами</b>				
54	$B_{\text{з1}}, \text{Тл}$	таблица 1.14	1,85	—
55	$b_{\text{з1}}, \text{мм}$	(1.25)	$13,3 \cdot 0,9 / (0,97 \cdot 1,85) = 6,67$	—
56	$h_{\text{с1}}, \text{мм}$	(1.26)	$7,9 \cdot 10^3 / (2 \cdot 0,97 \cdot 115 \cdot 1,65) = 21,5$	—
57	$h_{\text{п1}}, \text{мм}$	(1.27)	$[(233 - 153) / 2] - 21,5 = 18,5$	—
58	$b_1, \text{мм}$	(1.26)	$[\pi (153 + 2 \cdot 18,5) / 36] - 6,67 = 9,9$	—
59	$b'_{\text{п1}}, \text{мм}$	(1.36)	$0,3 \sqrt{132} = 3,5$	—
60	$b_2, \text{мм}$	(1.29)	$[\pi (153 + 2 \cdot 0,5 - 3,5) - 36 \cdot 6,67] /$ $/ (36 - \pi) = 7,07$	—
61	Проверка $b_1$ и $b_2, \text{мм}$	(1.30)	$36 (9,9 - 7,07) + \pi (7,07 - 3,5) -$ $- 2 \pi (18,5 - 0,5) = 0$	—
62	$S_{\text{п1}}, \text{мм}^2$	(1.31)	$\frac{9,9 + 7,07}{2} (18,5 - 0,5 - \frac{7,07 - 3,5}{2}) = 137,6$	—
63	$S'_{\text{п1}}, \text{мм}^2$	(1.32)	$\left( \frac{9,9 + 7,07}{2} - 0,1 \right) (18,5 - 0,5 - \frac{7,07 - 3,5}{2} - 0,1) = 136,8$	—
64	$S_{\text{н}}, \text{мм}^2$	(1.33)	$0,25 (2 \cdot 18,5 + 9,9 + 7,07) =$ $13,5$	—
65	$S_{\text{нр}}, \text{мм}^2$	(1.34)	$0,5 \cdot 9,9 + 0,75 \cdot 7,07 = 10,25$	—
66	$S''_{\text{п1}}, \text{мм}^2$	(1.35)	$136,8 - 13,5 - 10,25 = 113,1$	—
67	$c(d')^2, \text{мм}^2$	(1.38) § 1.4	$113,1 \cdot 0,75 / 21 = 4,04$ $k'_{\text{н}} = 0,75$	—
68	$c$	§ 1.4	2	—



69	$d'$ мм	(1.39)	$\sqrt{0,75 \cdot 113,1 / (21 \cdot 2)} = 1,41$	–
----	---------	--------	---	---

Продолжение таблицы 1.22

70	$d / d'$ , мм	приложение А (таблица А.1)	1,32 / 1,405	–
71	$S$ , мм <sup>2</sup>	приложение А (таблица А.1)	1,368	–
72	$k_{\Pi}$	(1.37)	$21 \cdot 2 \cdot 1,405^2 / 113,1 = 0,73$	–
73	$b''_{\text{ш1}}$ , мм	(1.40)	$1,405 + 2 \cdot 0,25 + 0,4 = 2,305$ ; принимая $b_{\text{ш1}} = b'_{\text{ш1}} = 3,5$	–
74	$J_1$ , А / мм <sup>2</sup>	(1.41)	$15,2 / (2 \cdot 1,368 \cdot 1) = 5,56$	–
75	$A_1 J_1$ , $A^2 / (\text{см} \cdot \text{мм}^2)$	§ 1.4	$239 \cdot 5,56 = 1329$	–
76	$(A_1 J_1)_{\text{доп}}$ , $A^2 / (\text{см} \cdot \text{мм}^2)$	рисунок 1.8	$2100 \cdot 0,75 = 1575$	–
77	$t_{\text{ср1}}$ , мм	(1.42)	$\pi (153 + 18,5) / 36 = 15$	–
78	$b_{\text{ср1}}$ , мм	(1.43)	$15 \cdot 9 = 135$	–
79	$l_{\text{л1}}$ , мм	(1.44)	$(1,16 + 0,14 \cdot 2) 135 + 15 = 209$	–
80	$l_{\text{ср1}}$ , мм	(1.45)	$2 (115 + 209) = 648$	–
81	$l_{\text{в1}}$ , мм	(1.46)	$(0,19 + 0,1 \cdot 2) \cdot 135 + 10 = 62,65$	–
<b>Обмотка статора с прямоугольными полукоткрытыми пазами</b>				
82	$B'_{\text{з1max}}$ , Тл	таблица 1.18	–	1,8
83	$h_{\text{ш1}}$ , мм	§ 1.4	–	1
84	$h_{\text{к}}$ , мм	§ 1.4	–	3
85	$t_{1\text{min}}$ , мм	(1.47)	–	$\pi (422 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 3) / 72 = 18,8$
86	$b'_{\text{з1min}}$ , мм	(1.48)	–	$18,8 \cdot 0,875 / (0,95 \cdot 1,8) = 9,6$
87	$b'_{\text{ш1}}$ , мм	(1.49)	–	$18,8 - 9,6 = 9,2$
88	$b_{\text{ш1}}$ , мм	(1.50)	–	$0,6 \cdot 9,2 = 5,5$
89	$N_{\text{ш}}$	§ 1.4	–	1
90	$2b_{\text{ш}}$ , мм	таблице 1.17	–	2,2
91	$b'_{\text{эф}}$ , мм	(1.51)	–	$(9,2 - 2,2 - 0,3) / 1 = 6,7$
92	$N_{\text{в}}$	(1.52)	–	$17/1 = 17$

93	$h'_{c1}$ , мм	(1.26)	–	$2,77 \cdot 10^4 /$ $/(2 \cdot 0,95 \cdot 225 \cdot 1,55) =$ $= 41,8$
94	$h'_{п1}$ , мм	(1.27)	–	$(590 - 422) / 2 - 41,8 = 42,2$

Продолжение таблицы 1.22

95	$h'_{эф}$ , мм	(1.53), таблица 1.20	–	$(42,2 - 4,5 - 3 - 1 - 0,3) /$ $/ 17 = 1,96$
96	$S'_{эф}$ , мм <sup>2</sup>	(1.54)	–	$1,96 \cdot 6,7 = 13,14$
97	$c$	§ 1.4	–	2
98	$c_b$	§ 1.4	–	2
99	$c_a$	§ 1.4	–	1
100	$a'$ , мм	(1.55), приложе ние А (таблица А.3)	–	$1,96 / 1 - 0,15 = 1,81$
101	$b'$ , мм	(1.56)	–	$6,7 / 2 - 0,15 = 3,2$
102	$a \times b$ , мм	приложе ние А (таблица А.2)	–	$1,8 \cdot 3,35$
103	$S$ , мм <sup>2</sup>	то же	–	5,667
104	$h_{п1}$ , мм	(1.57)	–	$17 \cdot 1 (1,8 + 0,15) + 4,5 +$ $+ 0,3 = 38$
105	$b_{п1}$ , мм	(1.58)	–	$1 \cdot 2 (3,35 + 0,15) + 2,2 +$ $+ 0,3 = 9,5$
106	$h_{c1}$ , мм	(1.26)	–	$(590 - 422) / 2 - 38 = 46$
107	$b_{з1min}$ , мм	(1.59)	–	$18,8 - 9,5 = 9,3$
108	$B_{з1max}$ , мм	(1.60)	–	$18,8 \cdot 0,875 (9,3 \cdot 0,95) =$ $= 1,8$
109	$I_1$ , А / мм <sup>2</sup>	(1.41)	–	$171,5 / (2 \cdot 5,667 \cdot 3) = 5,04$
110	$A_1 J_1$ , А <sup>2</sup> / (см <sup>3</sup> ·мм <sup>2</sup> )	§ 1.4	–	$528 \cdot 5,04 = 2661$
111	$(A_1 J_1)_{доп}$ , А <sup>2</sup> / (см <sup>3</sup> ·мм <sup>2</sup> )	рисунок 1.8, таблица 1.16	–	$3350 \cdot 0,86 = 2880$
112	$t_{cp1}$ , мм	(1.42)	–	$\pi (422 + 38) / 72 = 0$
113	$b_{cp1}$ , мм	(1.43)	–	$20 \cdot 9 = 180$
114	$l_{п1}$ , мм	(1.61)	–	$1,3 \cdot 180 + 38 + 50 =$ $= 322$
115	$l_{cp1}$ , мм	(1.45)	–	$2 (225 + 322) = 1094$

116	$l_{B1}, \text{MM}$	(1.62)	–	$0,4 \cdot 180 + 38 / 2 + 25 =$ $= 116$
-----	---------------------	--------	---	---

## 1.5 Обмотка короткозамкнутого ротора

**Обмотка ротора с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами.** Пазы ротора имеют обычно овальную форму (рисунок 1.10 *а* и *б*), причем радиусы  $r_1$  и  $r_2$  принимают такими, чтобы стенки зубцов были параллельны ( $b_{32} = \text{const}$ ) на протяжении расстояния  $h_1$ . Такие пазы применяют в двигателях с  $h \leq 250$  мм. В двигателях с  $h \leq 132$  мм пазы обычно выполняют полузакрытыми, а с  $h \geq 160$  мм – закрытыми.

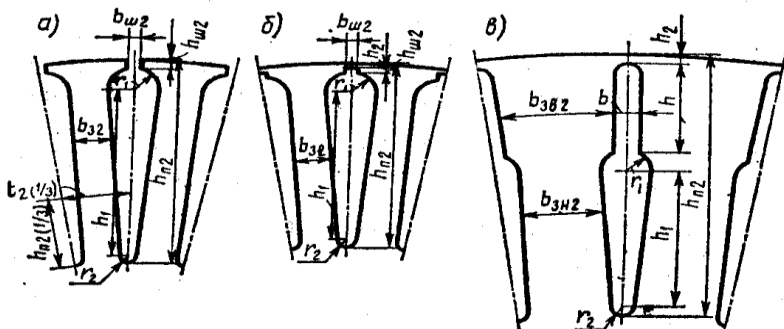


Рисунок 1.10 – Пазы короткозамкнутого ротора:

*а* – овальные полузакрытые; *б* – овальные закрытые; *в* – бутылочной формы

Примерные значения высот пазов короткозамкнутого ротора  $h_{п2}$  приведены на рисунке 1.12. Чем больше принимаемое значение  $h_{п2}$ , тем меньше высота спинки ротора  $h_{с2}$  и соответственно больше магнитная индукция в спинке  $B_{с2}$ . Если при проверке расчетом значение  $B_{с2}$  превысит предел, равный 1,6 Тл, то высоту паза  $h_{п2}$ , принятую из рисунка, снижают. Расчет размеров зубцовой зоны (зубцов и пазов) ротора начинают с определения ширины зубца  $b_{32}$ , исходя из средних значений магнитной индукции в зубцах ротора  $B_{32}$  (таблице 1.23).

Таблица 1.23 – Расчет размеров зубцов и пазов ротора

$h$ , мм	$2p$	$B_{32}$ (Тл) для степени защиты	
		IP44	IP23
50 – 132	2; 4; 6; 8	1,60 – 1,80	1,85 – 2,05
160 – 250	2	1,75 – 1,95	1,85 – 2,05
	4; 6; 8	1,70 – 1,90	1,75 – 1,95
280 – 355	2	1,60 – 1,80	1,80 – 2,00
	4	1,80 – 2,00	2,00 – 2,20
	6; 8; 10; 12	1,70 – 1,90	1,80 – 2,00

Определяют радиусы пазов  $r_1$  и  $r_2$ , обеспечивающие постоянство  $b_{32}$ . Если окажется, что  $r_2 < 1$  (для  $h \leq 132$  мм) или  $r_2 < 2$  (для  $h \geq 160$  мм), то следует уменьшить  $b_{32}$ , повысив  $B_{32}$ .

Определение размеров овальных полузакрытых и закрытых пазов производят в последовательности, указанной в таблице 1.24:

**Таблица 1.24 – Формулы для расчета размеров овальных пазов**

Высота паза (мм)	$h_{n2}$ – из рисунка 1.12	
Расчетная высота спинки ротора (мм):		
для $h \leq 63$ мм, $2p = 2$	$h_{c2} = 0,49D_{n2} - h_{n2}$	(1.64)
для $h \leq 63$ мм, $2p \geq 4$	$h_{c2} = 0,4D_{n2} - h_{n2}$	(1.65)
для $h \geq 71$ мм, $2p = 2$	$h_{c2} = 0,58D_{n2} - h_{n2} - \frac{2}{3}d_{к2}$	(1.66)
для $h \geq 71$ мм, $2p \geq 4$	$h_{c2} = 0,38D_{n2} - h_{n2} - \frac{2}{3}d_{к2}$	(1.67)
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B_{c2} = \Phi \cdot 10^6 / (2k_c l_2 h_{c2})$	(1.68)
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	$t_2 = \pi D_{n2} / z_2$	(1.69)
Магнитная индукция в зубцах ротора (Тл)	$B_{32}$ – по таблице 1.18	
Ширина зубца (мм)	$b_{32} = t_2 B_{\delta} / (B_{32} k_c)$	(1.70)
Меньший радиус паза (мм)	$r_2 = \frac{\pi(D_{n2} - 2h_{n2}) - z_2 b_{32}}{2(z_2 - \pi)}$	(1.71)
Больший радиус паза (мм)	$r_1 = \frac{\pi(D_{n2} - h_{n2} - 2h_2) - z_2 b_{32}}{2(z_2 + \pi)}$	(1.72)
Расстояние между центрами радиусов (мм)	$h_1 = h_{n2} - h_{m2} - h_2 - r_1 - r_2$	(1.73)
Проверка правильности определения $r_1$ и $r_2$ исходя из условия $b_{32} = \text{const}$	$\pi h_1 - z_2(r_1 - r_2) \approx 0$	(1.74)
Площадь поперечного сечения стержня, равная площади поперечного сечения паза в штампе (мм <sup>2</sup> )	$S_{ст} = S_{n2} = 0,5\pi(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2)h_1$	(1.75)

Здесь для полузакрытого паза  $h_{m2} = 0,5 \div 0,75$  мм;  $h_2 = 0$ ;  $b_{m2} = 1,0 \div 1,5$  мм; для закрытого паза  $h_{m2} = 0,7$  мм;  $h_2 = 0,3$  мм;  $b_{m2} = 1,5$  мм. При отсутствии аксиальных каналов в роторе  $d_{к2} = 0$ .

**Пазы ротора бутылочной формы.** Пазы короткозамкнутого ротора двигателей с  $h = 280 \div 355$  мм обычно имеют бутылочную форму и выполняются закрытыми (рисунок 1.10, в). Размеры нижней части

бутылочного паза выбирают так, чтобы обеспечить равновеликое поперечное сечение зубцов  $b_{3.н.2}$  на протяжении  $h_1$ .

Ход расчета аналогичен описанному для ротора с овальными пазами. По рисунку 1.12 выбирают примерное значение высоты паза ротора  $h_{п2}$ . Этим определяется расчетная высота спинки ротора  $h_{с2}$  и магнитная индукция в спинке ротора  $B_{с2}$ , которая не должна превышать 1,6 Тл. Затем находят ширину зубца в его нижней части  $b_{3.н.2}$ , исходя из того, чтобы магнитная индукция в нижней части зубцов ротора  $B_{3.н.2}$  не превосходила бы значений, приведенных в таблице 1.18.

Для верхней части паза принимают  $h_2 = 0,2 \div 0,5$  мм;  $h = 15$  мм; затем рассчитывают размеры нижней части паза: больший  $r_1$  и меньший  $r_2$  радиусы; расстояние между их центрами, а также ширину верхней части стержня  $b$ . Значение  $r_2$  должно быть не менее 2 мм, иначе следует уменьшить  $b_{3.н.2}$ , повысив  $B_{3.н.2}$ .

Определение размеров пазов ротора бутылочной формы производят в последовательности, указанной в таблице 1.25:

**Таблица 1.25 – Формулы для расчета размеров пазов бутылочной формы**

Высота паза (мм)	$h_{п2}$ – из рисунка 1.12	
Расчетная высота спинки ротора (мм)	$h_{с2}$ – по (1.66) и (1.67)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B_{с2}$ – по (1.68)	
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	$t_2$ – по (1.69)	
Ширина зубца в нижней части (мм)	$b_{3.н.2}$ – по (1.70)	
Меньший радиус паза (мм)	$r_2 = \frac{\pi(D_{н2} - 2h_{п2}) - z_2 b_{3.н.2}}{2(z_2 - \pi)}$	(1.76)
Больший радиус паза (мм)	$r_1 = \frac{\pi(D_{н2} - 2h_2 - 2h) - z_2 b_{3.н.2}}{2(z_2 + \pi)}$	(1.77)
Расстояние между центрами радиусов (мм)	$h_1 = h_{п2} - h_2 - h - r_1 - r_2$	(1.78)
Правильность определения $r_1$ и $r_2$ исходя из требования $b_{3.н.2} = \text{const}$	по (1.74)	
Ширина верхней части стержня (мм)	$b \approx (1 \div 1,25) r_1$	(1.79)
Площадь поперечного сечения нижней части стержня (мм <sup>2</sup> )	$S_{ст.н} = \frac{\pi}{2}(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2)h_1$	(1.80)
Площадь поперечного сечения верхней части стержня (мм <sup>2</sup> )	$S_{ст.в} = b(h - 0,11b)$	(1.81)
Общая площадь поперечного сечения стержня, равная площади поперечного сечения паза в штампе	$S_{ст} = S_{п2} = S_{ст.н} + S_{ст.в}$	(1.82)



Размеры открытых пазов ротора прямоугольной формы определяют в последовательности, указанной в таблице 1.26:

Таблица 1.26 – Формулы для расчета открытых пазов прямоугольной формы

<b>Предварительные размеры</b>		
Высота паза (мм)	$h'_{п2}$ – из рисунка 1.12	
Высота спинки ротора (мм)	$h'_{с2}$ – по (1.66) или (1.67)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B'_{с2}$ – по (1.68)	
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	$t_2$ – по (1.69)	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{32\min} = t_2 B_{\delta} / (B'_{32\max} k_c)$	(1.83)
Ширина паза (мм)	$b'_{п2} = [\pi(D_{п2} - 2h'_{п2}) / z_2] - b'_{32\min}$	(1.84)
Размеры стержня по высоте (мм)	$h'_{ст} = h'_{п2} - h_c - h_{п2}$	(1.85)
То же, по ширине	$b'_{ст} = b'_{п2} - b_c$	(1.86)
<b>Уточненные размеры</b>		
Ближайшие стандартные размеры стержня (мм) и его сечение (мм <sup>2</sup> )	$h_{ст}, b_{ст}$ и $S_{ст}$ – по приложению А (таблица А.4)	
Высота паза (мм)	$h_{п2} = h_{ст} + h_c + h_{п2}$	(1.87)
Ширина паза (мм)	$b_{п2} = b_{ст} + b_c$	(1.88)
Площадь поперечного сечения паза (мм <sup>2</sup> )	$S_{п2} = h_{п2} b_{п2}$	(1.89)
Высота спинки ротора (мм)	$h_{с2}$ – по (1.66) или (1.67)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B_{с2}$ – по (1.68)	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b_{32\min} = [\pi(D_{п2} - 2h_{п2}) / z_2] - b_{п2}$	(1.90)
Магнитная индукция в наиболее узком месте зубца (Тл)	$B_{32\max} = t_2 B_{\delta} / (b_{32\min} k_c)$	(1.91)
Длина стержня (мм)	$l_{ст} = l_2 + 2l_{л2}$	(1.92)
Здесь $h_c$ и $b_c$ – припуски на сборку сердечника (см. §1.4); $h_c = 4$ мм.		

**Короткозамыкающее кольцо обмотки ротора.** На рисунке 1.13 показаны короткозамыкающие кольца для литой (а) и сварной (б) конструкций клетки. Размеры кольца определяют следующим образом. Поперечное сечение кольца  $S_{кл}$  связано с ранее определенным сечением стержня клетки  $S_{ст}$ , а высота кольца  $h_{кл}$  – с высотой паза  $h_{п2}$ . Это



предопределяет длину кольца  $l_{\text{кл}}$ . Для определения расположения кольца клетки вычисляют его средний диаметр  $D_{\text{кл.ср}}$ .

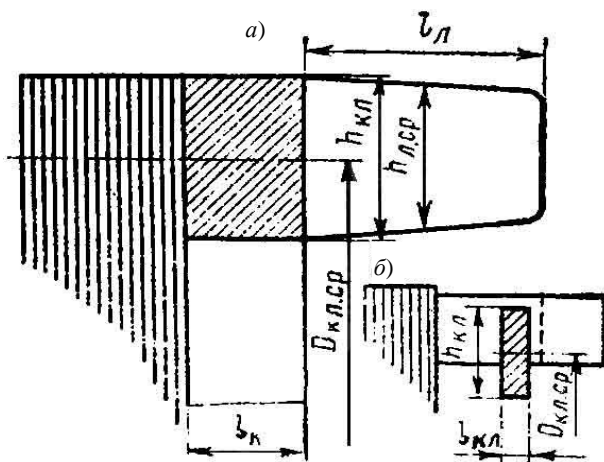


Рисунок 1.13 – Короткозамыкающие кольца ротора

Размеры короткозамыкающего кольца находят в последовательности, приведенной в таблице 1.27. В таблице 1.28 приведен пример расчета обмотки короткозамкнутого ротора.

Таблица 1.27 – Формулы для расчета размеров короткозамыкающего кольца

Поперечное сечение кольца (мм <sup>2</sup> ): литой клетки	$S_{\text{кл}} = (0,35 \div 0,45) z_2 S_{\text{ст}} / (2p)$	(1.93)
сварной клетки	$S_{\text{кл}} = 0,4 z_2 S_{\text{ст}} / (2p)$	(1.94)
Высота кольца (мм): литой клетки	$h_{\text{кл}} \approx (1,1 \div 1,2) h_{\text{п2}}$	(1.95)
сварной клетки	$h_{\text{кл}} \approx 1,2 h_{\text{п2}}$	(1.96)
Длина кольца (мм)	$l_{\text{кл}} = S_{\text{кл}} / h_{\text{кл}}$	(1.97)
Средний диаметр кольца (мм): литой клетки	$D_{\text{кл.ср}} = D_{\text{п2}} - h_{\text{кл}}$	(1.98)
сварной клетки	$D_{\text{кл.ср}} = D_{\text{п2}} - 2h_{\text{п2}} - 2h_{\text{кл}} - 0,5h_{\text{ст}}$	(1.99)
Вылет лобовой части обмотки (мм)	$l_{\text{Б2}} = k_{\text{л}} l_{\text{л2}} + l_{\text{кл}}$	(1.100)

Здесь  $l_{л2} = 50$  мм – длина лобовой части стержня;  $k_{л2} = 0,9$  – коэффициент, учитывающий изгиб стержня

Таблица 1.28– Пример расчета обмотки короткозамкнутого ротора

№п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1
<b>Размеры овальных полузакрытых пазов</b>			
117	$h_{п2}$ , мм	рисунок 1.12	25,5
118	$h_{с2}$ , мм	(1.67)	$0,38 \cdot 152,3 - 25,5 - (2 / 3) \cdot 0 = 32,4$
119	$B_{с2}$ , Тл	(1.68)	$0,0079 \cdot 10^6 / (2 \cdot 0,97 \cdot 115 \cdot 32,4) = 1,09$
120	$t_2$ , мм	(1.69)	$\pi \cdot 152,3 / 34 = 14$
121	$B_{з2}$ , Тл	таблица 1.18	1,7
122	$b_{з2}$ , мм	(1.70)	$14 \cdot 0,9 / (1,7 \cdot 0,97) = 7,6$
123	$r_2$ , мм	(1.71)	$\frac{\pi(152,3 - 2 \cdot 25,5) - 34 \cdot 7,6}{2(34 - \pi)} \approx 1,0$
124	$r_1$ , мм	(1.72)	$\frac{\pi(152,3 - 2 \cdot 0,75 - 2 \cdot 0,3) - 34 \cdot 7,6}{2(34 + \pi)} = 2,9$
125	$h_1$ , мм	(1.73)	$25,5 - 0,75 - 0 - 1 - 2,9 = 20,8$
126	проверка $r_1$ и $r_2$	(1.74)	$\pi \cdot 20,8 - 34 (2,9 - 1) \approx 0$
127	$S_{ст} = S_{п2}$ , мм <sup>2</sup>	(1.75)	$(\pi / 2)(2,9^2 + 1^2) + (2,9 + 1) 20,8 = 95,9$
<b>Размеры короткозамкнутого кольца</b>			
128	$S_{кл}$ , мм <sup>2</sup>	(1.93)	$0,4 \cdot 34 \cdot 95,9 / 4 = 326$
129	$h_{кл}$ , мм	(1.95)	$1,2 \cdot 25,5 = 30,6$
130	$l_{кл}$ , мм	(1.97)	$326 / 30,6 = 10,65$
131	$D_{кл.ср.}$ , мм	(1.98)	$152,3 - 30,6 = 121,7$

## 1.6 Обмотка фазного ротора

**Тип обмотки и общие положения.** Обычно в роторах применяют двухслойную волновую обмотку из медных изолированных стержней прямоугольного поперечного сечения. В пазу располагают по два стержня (один над другим, большей стороной по высоте паза). Следовательно, количество проводников в пазу  $N_{п2} = 2$ . Если по расчету сечение эффективного стержня получается больше 100 мм<sup>2</sup>, то его разделяют на два элементарных; тогда по ширине паза располагают два стержня, изолированных вместе. На рисунке 1.14 приведена для примера развернутая схема двухслойной волновой обмотки фазного ротора. Количество пазов ротора  $z_2$  должно выбираться с учетом рекомендаций, приведенных в § 1.3, и, в частности, по таблице 1.12. Количество пазов

на полюс и фазу ротора  $q_2$  определяется по (1.6). Обмотка имеет одну параллельную ветвь  $a_2 = 1$ . Количество последовательно соединенных витков обмотки одной фазы

$$w_2 = 2pq_2. \quad (1.101)$$

Шаги обмотки для целого и дробного  $q_2$  находят следующим образом. При целом  $q_2$  шаги секций с передней (со стороны выводов) и с задней стороны  $y_{n2}$  и  $y'_{n2}$  принимаются равными  $3q_2$ , а шаг в конце обхода ротора укороченный:  $y''_{n2} = 3q_2 - 1$ . При дробном  $q_2$  шаг обмотки с передней стороны  $y_{n2} = 3q_2 - 1/2$ , с задней  $y'_{n2} = 3q_2 + 1/2$ , а шаг в конце обхода  $y''_{n2} = 3q_2 - 1/2$ . Обмотка с дробным  $q_2$  считается обмоткой с укороченным шагом; при этом  $\beta_2 \approx 0,96$ . Коэффициенты распределения  $k_{p2}$ , укорочения  $k_{y2}$  и обмоточный коэффициент  $k_{o62}$  определяются так же, как для обмотки статора по (1.15) с заменой  $q_1$  на  $q_2$ ,  $z_1$  на  $z_2$ ,  $\beta_1$  на  $\beta_2$ .

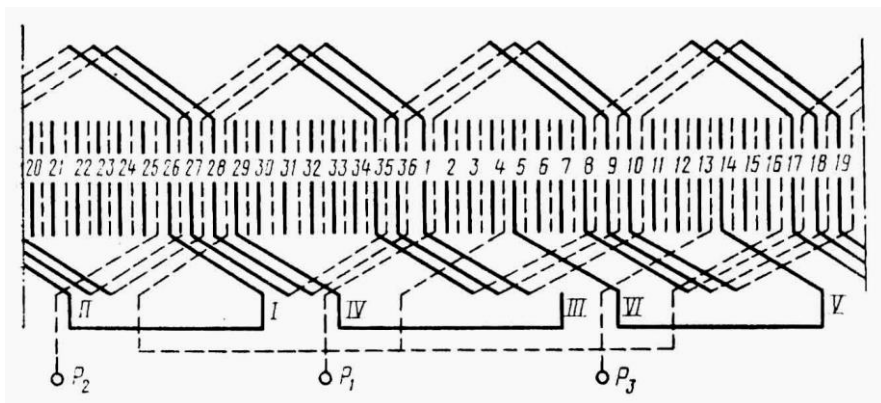


Рисунок 1.14 – Схема двухслойной волновой обмотки фазного ротор (одной фазы)  $Z_2=36$ ;  $2p=4$ ;  $q_2=3$ ;  $a=1$

Коэффициент трансформации ЭДС и тока

$$k_{tr} = w_1 k_{o61} / (w_2 k_{o62}). \quad (1.102)$$

Электродвижущая сила обмотки (В)

$$E_2 = k_n U_1 / k_{tr}. \quad (1.103)$$

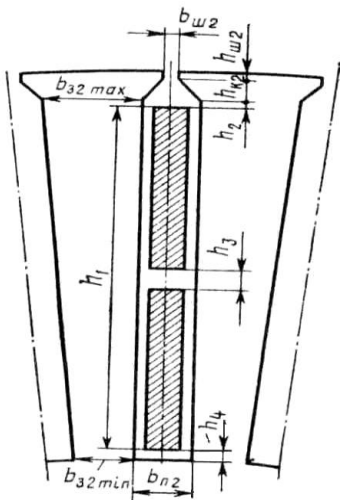
При соединении обмотки ротора в звезду напряжение на кольцах (В)

$$U_k \approx \sqrt{3} E_2. \quad (1.104)$$

Для уменьшения тока, проходящего через кольца, и соответственно потерь в щеточном контакте рекомендуется выбирать отношение напряжения к току кольца  $U_k / I_k = 0,6 \div 2,5$  (большие значения для больших двигателей), но  $U_k$  должно быть не больше 1200 В.

На контактных кольцах асинхронного двигателя с фазным ротором устанавливаются металлографитные щетки марки МГ4.

### Обмотка фазного ротора с прямоугольными полузакрытыми пазами.



Прямоугольные полузакрытые пазы фазного ротора имеют форму, показанную на рисунке 1.15.

Они применяются в электродвигателях с  $h \geq 225$  мм. Для нахождения ширины зубца в наиболее узком месте  $b'_{32 min}$  следует принять значение индукции в этой части зубца  $B'_{32 max}$  по таблице 1.29 и определить предварительное значение  $b'_{32 min}$  по (1.83). Предварительное значение высоты паза ротора  $h'_{n2}$  берут по таблице 1.30.

Этим определяется предварительное значение высоты

спинки ротора  $h'_{c2}$  и магнитная индукция в спинке ротора  $B'_{c2}$ , которая не

Рисунок 1.15 – Пазы фазного ротора  
прямоугольные полузакрытые

должна превышать 1,6 Тл. Затем находят предварительную ширину паза и допустимые высоту и

ширину стержня обмотки ротора. Определяют ближайшие стандартные размеры стержня и его сечение. Потом устанавливают окончательные размеры зубцовой зоны, высоту спинки ротора, индукции и размеры катушки обмотки.

Таблица 1.29 – Значение индукции в наиболее узкой части зубца

$2p$	$B'_{32 max}$ (Тл) для двигателей со степенью защиты	
	IP44	IP23
4	1,8 – 2,2	1,9 – 2,35
6 – 12	1,7 – 2,1	1,7 – 2,1

Таблица 1.30 – Предварительное значение высоты паза ротора

$2p$	$h'_{n2}$ , мм	$2p$	$h'_{n2}$ , мм
4	$33,5 + 0,024D_{n1}$	8	$29 + 0,024D_{n1}$
6	$31,4 + 0,024D_{n1}$	10 и 12	$25,8 + 0,024D_{n1}$

В таблице 1.31 приведены (для классов нагревостойкости  $B$ ,  $F$  и  $H$ ) значения общей толщины изоляции в пазу ротора по высоте и ширине  $h_{n2}$

и  $2b_{н2}$ , включающие толщину изоляции стержня, размеры прокладок и припусков на укладку:

*Таблица 1.31 – Значения общей толщины изоляции в пазу ротора*

Высота оси вращения $h$ , мм	225 – 250	280 – 335	400 – 450
Высота $h_{н2}$ , мм	4,3	4,5	7,1
Ширина $2b_{н2}$ , мм	1,4	1,6	3,0

Значение  $h_{н2}$  не учитывает высоту клина  $h_{к2}$ . Размеры следует принимать такими: для клина  $h_{к2} = 2$  мм (при  $h \leq 250$  мм),  $h_{к2} = 2,5$  мм (при  $h = 280 \div 355$  мм),  $h_{к2} = 3,5$  мм (при  $h > 355$  мм); для шлица  $h_{ш2} = 1,0$  мм,  $b_{ш2} = 1,5$  мм. Конструкция изоляции обмоток фазного ротора представлена в приложении А (таблицы А.14 и А.15). Размеры прямоугольных полузакрытых пазов ротора и расположенных в них проводов рассчитывают в последовательности, приведенной в таблице 1.32:

*Таблица 1.32 – Формулы для прямоугольных полузакрытых пазов ротора*

Предварительные значения		
Высота паза (мм)	$h'_{н2}$ – по таблице 1.30	
Высота спинки ротора (мм)	$h'_{с2}$ – по (1.67)	
Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B'_{с2}$ – по (1.68)	
Зубцовое деление по наружному диаметру ротора (мм)	$t_2$ – по (1.69)	
Магнитная индукция в наиболее узком месте зубца, ротора (Тл)	$B'_{з2max}$ – по таблице 1.18	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b'_{з2min}$ – по (1.83)	
Ширина паза, (мм)	$b'_{н2}$ – по (1.84)	
Размеры стержня по высоте, (мм)	$h' = (h'_{н2} - h_{н2} - h_{к2} - h_{ш2} - h_c) / 2$	(1.105)
То же, по ширине (мм)	$b' = b'_{н2} - 2b_{н2} - b_c$	(1.106)
Ближайшие стандартные размеры стержня (мм) и его сечение (мм <sup>2</sup> )	$h_{ст}, b_{ст}, S_{ст}$ – по приложению А (таблица А.2)	
Количество элементарных стержней в одном эффективном	Обычно $c_2 = 1$ ; при $S_{ст} \geq 100$ мм <sup>2</sup> можно принять $c_2 = 2, 3$ или 4	
Уточненные значения		
Высота паза (мм)	$h_{н2} = 2h_{ст} + h_{н1} + h_{к2} + h_{ш2} + h_c$	(1.107)

Ширина паза, (мм)	$b_{п2} = b_{ст} + 2b_{и2} + b_c$	(1.108)
Высота спинки ротора (мм)	$h_{с2}$ – по (1.67)	

Продолжение таблицы 1.32

Магнитная индукция в спинке ротора (Тл)	$B_{c2}$ – по (1.68)	
Ширина зубца в наиболее узком месте (мм)	$b_{z2min}$ – по (1.90)	
Магнитная индукция в наиболее узком месте зубца, (Тл)	$B_{z2max}$ – по (1.91)	
Среднее зубцовое деление ротора (мм)	$t_{cp2} = \pi(D_{n2} - h_{n2}) / z_2$	(1.109)
Средняя ширина катушки обмотки (мм)	$b_{cp2} = t_{cp2} y_{п.ср2}$	(1.110)
Средняя длина лобовой части катушки обмотки (мм) при $U_k \leq 750$ В	$l_{n2} = 1,2b_2 + h_{n2} + 50$	(1.111)
при $U_k > 750$ В	$l_{n2} = 1,2b_2 + h_{n2} + 70$	(1.112)
Средняя длина витка обмотки (мм)	$l_{cp2} = 2(l_2 + l_{n2})$	(1.113)
Вылет лобовой части обмотки (мм): при $U_k \leq 750$ В	$l_{B2} = 0,3b_{cp2} + (h_{n2} / 2) + 25$	(1.114)
при $U_k > 750$ В	$l_{B2} = 0,3b_{cp2} + (h_{n2} / 2) + 35$	(1.115)
Здесь $y_{п.ср2}$ – средний шаг секции по пазам, равной полусумме шагов с передней и с задней стороны; $h_c$ и $b_c = 0,3$ для $h \leq 350$ мм, а для $h \geq 400$ мм – $h_c$ и $b_c = 0,35$ мм		

Для фазного ротора выбраны прямоугольные полузакрытые пазы.

Двухслойная волновая обмотка из медных изолированных стержней прямоугольного сечения, количество параллельных ветвей  $a_2 = 1$ ; количество эффективных проводников в пазу  $N_{n2} = 2$ .

В таблице 1.33 приведен пример расчета обмотки фазного ротора.

Таблица 1.33 – Пример расчета обмотки фазного ротора

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №2
132	$w_3$	(1.101)	$6 \cdot 4,5 = 27$
133	$y_{n2}$	§ 1.6	$3 \cdot 4,5 - 1/2 = 13$
134	$y'_{n2}$	§ 1.6	$3 \cdot 4,5 + 1/2 = 14$
135	$y''_{n2}$	§ 1.6	$3 \cdot 4,5 - 1/2 = 13$
136	$k_{p2}$	(1.11)	$0,5 / [4,5 \sin(60 / (4,5 \cdot 2))] = 0,95$
137	$\beta_2$	§ 1.6	0,96
138	$k_{y2}$	(1.14)	$\sin(0,96 \cdot 90^\circ) = 0,998$
139	$k_{об2}$	(1.15)	$0,956 \cdot 0,998 = 0,954$



140	$k_{тр}$	(1.102)	$68 \cdot 0,886 / (27 \cdot 0,954) = 2,33$
<i>Продолжение таблицы 1.33</i>			
141	$E_2, В$	(1.103)	$0,98 \cdot 380 / 2,33 = 160$
142	$U_k, В$	(1.104)	$\sqrt{3} \cdot 160 = 277$
143	$h'_{п2}, мм$	таблица 1.30	45,5
144	$h'_{с2}, мм$	(1.67)	$0,38 \cdot 420,2 - 45,5 - (2 / 3)40 = 87,5$
145	$B'_{с2}, Тл$	(1.68)	$0,0277 \cdot 10^6 / (2 \cdot 0,95 \cdot 230 \cdot 87,5) = 0,724$
146	$t_2, мм$	(1.69)	$\pi \cdot 420,2 / 81 = 16,3$
147	$B'_{з2max}, Тл$	таблица 1.18	1,9
148	$b'_{з2min}, мм$	(1.83)	$16,3 \cdot 0,875 / (1,9 \cdot 0,95) = 7,9$
149	$b'_{п2}, мм$	(1.84)	$[\pi \cdot (420,2 - 2 \cdot 45,5) / 81] - 7,9 = 4,87$
150	$h', м$	(1.105)	$(45,5 - 4,5 - 2,5 - 1,0 - 0,3) / 2 = 18,6$
151	$b', мм$	(1.106)	$4,87 - 1,6 - 0,3 = 2,97$
152	$h_{ст}, мм$	приложение А (таблица А.2)	18,0
153	$b_{ст}, мм$	то же	$1,68 \cdot 2$
154	$S_{ст}, мм^2$	»	$29,6 \cdot 2$
155	$h_{п2}, мм$	(1.107)	$2 \cdot 18 + 4,5 + 2,5 + 1,0 + 0,3 = 44$
156	$b_{п2}, мм$	(1.108)	$1,68 \cdot 2 + 1,6 + 0,3 = 5,18$
157	$h_{с2}, мм$	(1.67)	$0,38 \cdot 420,2 - 44,3 - (2 / 3)40 = 88,7$
158	$B_{с2}, Тл$	(1.68)	$0,0277 \cdot 10^6 / (2 \cdot 0,95 \cdot 230 \cdot 88,7) = 0,715$
159	$b_{з2min}, мм$	(1.90)	$[\pi \cdot 420,2 - 2 \cdot 44,3) / 81] - 5,18 = 7,7$
160	$B_{з2max}, Тл$	(1.91)	$\frac{16,3 \cdot 0,875}{7,7 \cdot 0,95} = 1,95$
161	$t_{ср2}, мм$	(1.109)	$\pi \cdot 420,2 - 44,3) / 81 = 14,58$
162	$b_{ср2}, мм$	(1.110)	$14,58 \cdot 13,5 = 197$
163	$l_{л2}, мм$	(1.111)	$1,2 \cdot 197 + 44,3 + 50 = 330,7$
164	$l_{ср2}, мм$	(1.113)	$2 (230 + 330,7) = 1121$
165	$l_{в2}, мм$	(1.114)	$0,3 \cdot 197 + 44,3 / 2 + 25 = 106,2$

## 1.7 Расчет магнитной цепи

**Основные положения.** В электрических машинах с симметричной магнитной цепью, а к таким машинам относятся асинхронные двигатели, можно ограничиться расчетом МДС на полюс.

Магнитная цепь асинхронного двигателя состоит из следующих пяти однородных участков, соединенных последовательно: воздушный зазор между ротором и статором, зубцы статора, зубцы ротора, спинка статора, спинка ротора. При расчете магнитного напряжения каждого участка принимают, что магнитная индукция на участке распределена равномерно.

Расчет магнитной цепи электродвигателя производят в такой последовательности. Для каждого участка определяют его площадь

поперечного сечения, магнитную индукцию, напряженность поля, среднюю длину пути магнитного потока, МДС участка, суммарную МДС.

В отличие от машин синхронных и постоянного тока расчет суммарной МДС у асинхронных двигателей производят только для номинального режима работы. Расчет магнитной цепи ведут по основной волне магнитного поля; в соответствии с этим магнитная индукция в воздушном зазоре  $B_\delta$  является в расчете амплитудой основной волны.

Насыщение магнитной цепи вызывает уплощение кривой поля; соответственно при повышенной индукции магнитное сопротивление зубцов по середине полюсного деления больше, чем по краям. Для облегчения расчета в приложении А (таблицы А.8 – А.10) приведены таблицы намагничивания  $H = f(B)$  для зубцов статора и ротора, вычисленные с учетом уплощения поля; эти таблицы используют при расчете магнитного напряжения участка зубцов. При расчете магнитной цепи условно принимают среднюю длину пути магнитного потока в спинке статора или ротора; в действительности длина этих путей различна – максимальная по краям полюсного деления и минимальная посередине. Соответственно неравномерно распределяется индукция.

Для упрощения расчета в приложении А (таблицы А.11 – А.13) приведены таблицы намагничивания  $H = f(B)$  для спинки статора и ротора, вычисленные с учетом синусоидального распределения индукции вдоль силовой линии; эти таблицы используют при расчете магнитного напряжения спинки ротора и статора.

Основное сопротивление магнитной цепи асинхронного двигателя сосредоточено в воздушном зазоре между ротором и статором. Это сопротивление увеличивается дополнительно из-за зубчатого строения статора и ротора; увеличение его учитывается соответствующим поправочным коэффициентом, который больше единицы. При наличии радиальных вентиляционных каналов в сердечнике статора или ротора часть магнитного потока проходит через каналы, снижая магнитное сопротивление воздушного зазора; это уменьшение учитывается коэффициентом, который меньше единицы.

При магнитной индукции в зубцах статора или ротора  $B \leq 1,8$  Тл принимают, что магнитный поток проходит только через зубцы, а напряженность магнитного поля  $H$  определяют соответственно по кривым для зубцов (приложение А (таблицы А.8 – А.10)). При  $B > 1,8$  Тл часть магнитного потока, проходящая через пазы, снижает действительную магнитную индукцию в зубцах. Это снижение учитывается коэффициентами  $k_z$ , зависящими от соотношения площадей рассматриваемых поперечных сечений зубца и паза, а для определения  $H$  с целью упрощения вычислений пользуются кривыми для зубцов по

приложению А (рисунки А.1 – А.3), рассчитанными для разных значений  $k_3^*$ .

У зубцов трапецеидального поперечного сечения (прямоугольные открытые или полуоткрытые пазы, верхняя часть бутылочных пазов ротора) кривая распределения напряженности поля  $H$  по высоте зубца близка к параболе. Если  $B_{\text{зmax}} > 1,8$  Тл, то при расчете магнитного напряжения зубцов напряженность поля определяют по индукции в трех расчетных сечениях зубца – минимальном, среднем и максимальном; среднее значение  $H$  при этом рассчитывают по формуле Симпсона (1.136). Если  $B_{\text{зmax}} \leq 1,8$  Тл, то с достаточной точностью можно определять  $H$  по индукции в одном сечении зубца, расположенном на расстоянии  $1/3$  его высоты (от окружности, соответствующей диаметру  $D_1$ ).

У зубцов равновеликого поперечного сечения (трапецеидальные пазы статора, овальные закрытые и полузакрытые пазы ротора, нижняя часть бутылочных закрытых пазов ротора) напряженность поля определяют по индукции в сечении  $1/3$  высоты зубца; при  $B_3 \leq 1,8$  Тл по приложению А (таблицы А.8 – А.10), а при  $B_3 > 1,8$  Тл – по приложению А (рисунки А.1 – А.3) с учетом коэффициента  $k_3$  ( $B_{31}$  и  $B_{32}$  определены в § 1.4 – 1.6).

Магнитную цепь рассчитывают в последовательности, указанной в таблице 1.34, а пример расчета приведен в таблице 1.35.

**Таблица 1.34 – Формулы для расчета магнитной цепи**

МДС для воздушного зазора		
Коэффициент, учитывающий увеличение магнитного сопротивления воздушного зазора вследствие зубчатого строения статора	$k_{\delta 1} = 1 + b_{\text{м1}} / (t_1 - b_{\text{м1}} + 5\delta t_1 / b_{\text{м1}})$	(1.116)
То же, с учетом ротора	$k_{\delta 2} = 1 + b_{\text{м2}} / (t_2 - b_{\text{м2}} + 5\delta t_2 / b_{\text{м2}})$	(1.117)
Коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного сопротивления воздушного зазора при наличии радиальных каналов на статоре или на роторе	$k_{\kappa} = 1 - 3\delta / [l_{\text{п}} + 3\delta(1 + l_{\text{п}} / l_{\kappa})]$	(1.118)
То же, при совпадающих каналах на статоре и на роторе	$k_{\kappa} = 1 - \frac{1,5\delta}{l_{\text{п}} + 1,5\delta(1 + l_{\text{п}} / l_{\kappa})}$	(1.119)

\*При наличии в сердечниках статора и ротора радиальных вентиляционных каналов значения коэффициента  $k_3$ , определяемые по приведенным ниже формулам, следует умножить на отношение  $l_1 / (l_1 - n_{\text{кл}} l_{\text{кл}})$ .



Продолжение таблицы 1.34

Общий коэффициент воздушного зазора	$k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_k$	(1.120)
МДС для воздушного зазора (А)	$F_{\delta} = 0,8\delta k_{\delta} B_{\delta} \cdot 10^3$	(1.121)
Здесь при открытых пазах в (1.116) и в (1.117) вместо $b_{n1}$ и $b_{n2}$ следует подставить соответственно $b_{n1}$ и $b_{n2}$ . При отсутствии радиальных каналов (на статоре или на роторе) следует принимать $k_k = 1$ , $l_n$ – длина пакета.		
<b>МДС для зубцов при трапецидальных полузакрытых пазах статора (рисунок 1.7)</b>		
При $B_{31} \leq 1,8$ Тл: напряженность магнитного поля	$H_{31}$ (А / см) – из приложения А (таблицы А.8 – А.10)	
При $B_{31} > 1,8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм)	$t_{1(1/3)} = \pi(D_1 + (2/3)h_{n1}) / z_1$	(1.122)
коэффициент зубцов	$k_{3(1/3)} = [t_{1(1/3)} / (b_{31} k_c)] - 1$	(1.123)
напряженность магнитного поля (А / см)	$H_{31}$ – из приложения А рисунки А.1 – А.3)	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{31} = h_{n1}$	(1.124)
МДС для зубцов (А)	$F_{31} = 0,1 H_{31} L_{31}$	(1.125)
<b>МДС для зубцов при прямоугольных открытых и полукрытых пазах статора (рисунок 1.9)</b>		
При $B_{31\max} \leq 1,8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца	$t_{1(1/3)}$ (мм) – по (1.122)	
ширина зубца (мм)	$b_{31(1/3)} = t_{1(1/3)} - b_{n1}$	(1.126)
магнитная индукция на 1/3 высоты зубца (Тл)	$B_{31(1/3)} = t_1 B_{\delta} / (b_{31(1/3)} k_c)$	(1.127)
напряженность магнитного поля в зубцах	$H_{31}$ (А/см) – из приложения А (таблицы А.8 – А.10)	
При $B_{31} > 1,8$ Тл: зубцовое деление статора (мм): по диаметру $D_1$	$t_1$ – по (1.22):	
в минимальном сечении зубца	$t_{1\min}$ – по (1.47)	
в максимальном сечении зубца	$t_{1\max} = \pi(D_1 + 2h_n) / z_1$	(1.128)

Продолжение таблицы 1.34

Ширина зубца (мм): в наиболее узкой части	$b_{31\min}$ – по (1.59)	
в наиболее широкой части	$b_{31\max} = t_{1\max} - b_{n1}$	(1.129)
в средней части	$b_{31cp} = (b_{31\min} + b_{31\max}) / 2$	(1.130)
Магнитная индукция зубца статора (Тл): в наиболее узкой части	$B_{31\max}$ – по (1.60)	
в наиболее широкой части	$B_{31\min} = t_1 B_\delta / (b_{31\max} k_c)$	(1.131)
в средней части	$B_{31cp} = t_1 B_\delta / (b_{31cp} k_c)$	(1.132)
Коэффициент зубцов: в наиболее узкой части	$k_{31\max} = [t_{1\min} / (b_{31\min} k_c)] - 1$	(1.133)
в наиболее широкой части *	$k_{31\min} = [t_{1\max} / (b_{31\max} k_c)] - 1$	(1.134)
в средней части *	$k_{31cp} = (k_{31\max} + k_{31\min}) / 2$	(1.135)
Напряженность магнитного поля: в наиболее узкой части	$H_{31\max} = f(B_{31\max}, k_{31\max}) -$ из приложения А рисунки А.1 – А.3)	
в наиболее широкой части	$H_{31\min} = f(B_{31\min}, k_{31\min}) -$ из	
в средней части	$H_{31cp} = f(B_{31cp}, k_{31cp}) -$ из приложения А (таблицы А.8 – А.10 или рисунки А.1 – А.3)	
Среднее значение напряженности магнитного поля в зубцах (А/см)	$H_{31} = (H_{31\max} + 4H_{31cp} + H_{31\min}) / 6$	(1.136)
Средняя длина пути (мм) магнитного потока	$L_{31}$ по (1.124)	
МДС для зубцов (А)	$F_{31}$ по (1.125)	
<b>МДС для зубцов при овальных полужакрытых и закрытых пазах ротора (рисунок 1.10 а, б)</b>		
При $B_{31} \leq 1,8$ Тл: напряженность магнитного поля (А / см)	$H_{32}$ – из приложения А (таблицы А.8 – А.10)	

Продолжение таблицы 1.34

При $B_{з1} > 1,8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм)	$t_{2(1/3)} = \pi(D_{н2} - \frac{4}{3}h_{н2}) / z_2$	(1.137)
коэффициент зубцов	$k_{з2(1/3)} = \left[ t_{2(1/3)} / (b_{з2} k_c) \right] - 1$	(1.138)
напряженность магнитного поля (А / см)	$H_{з2}$ – из приложения А рисунки А.1 – А.3)	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{з2} = h_{н2} - 0,2r_2$	(1.139)
МДС для зубцов (А)	$F_{з2} = 0,1H_{з2}L_{з2}$	(1.140)
<b>МДС для зубцов при бутылочных закрытых пазах ротора (рисунок 1.10, в)</b>		
Средняя ширина верхней части зубца (мм)	$b_{з,В2} = \pi(D_{н2} - 2h_2 - h) / z_2 - b$	(1.141)
Магнитная индукция в среднем сечении верхней части зубца (Тл); обычно – менее 1,8 Тл	$B_{з,В2} = t_2 B_\delta / (b_{з,В2} k_c)$	(1.142)
Напряженность магнитного поля в верхней части зубца (А / см)	$H_{з,В2}$ – из приложения А (таблицы А.8 – А.10)	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{з,В2} = h_2 + h$	(1.143)
МДС для верхней части зубца (А)	$F_{з,В2} = 0,1H_{з,В2}L_{з,В2}$	(1.144)
Магнитная индукция в нижней части зубца (Тл)	$B_{з,Н2} = t_2 B_\delta / (b_{з,Н2} k_c)$	(1.145)
При $B_{з, Н2} \leq 1,8$ Тл: напряженность поля (А / см) в нижней части зубца	$H_{з,Н2}$ – из приложения А (таблицы А.8 – А.10)	
При $B_{з, Н2} > 1,8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм)	$t_{н2(1/3)} = \pi \left[ D_{н2} - \frac{4}{3}h_{н2} - \frac{2}{3}(h_2 + h) \right] / z_2$	(1.146)
коэффициент зубцов	$k_{з,Н(1/3)} = \left[ t_{н2(1/3)} / (b_{з,Н2} k_c) \right] - 1$	(1.147)
напряженность магнитного поля (А / см) в нижней части зубца	$H_{з,Н2}$ – из приложения А рисунки А.1 – А.3)	
Средняя длина пути магнитного потока в нижней части зубца (мм)	$L_{з,Н2} = r_1 + h_1 + 0,8r_2$	(1.148)
МДС для нижней части зубца (А)	$F_{з,Н2} = 0,1H_{з,Н2}L_{з,Н2}$	(1.149)
МДС для зубцов ротора (А)	$F_{з2} = F_{з,В2} + F_{з,Н2}$	(1.150)

Продолжение таблицы 1.34

МДС для зубцов при прямоугольных пазах ротора (рисунок 1.11)		
При $B_{32\max} \leq 1,8$ Тл: зубцовое деление на 1/3 высоты зубца (мм)	$t_{2(1/3)} = \pi(D_{н2} - \frac{4}{3}h_{н2})/z_2$	(1.151)
ширина зубца на 1/3 высоты (мм)	$b_{32(1/3)} = t_{2(1/3)} - b_{н2}$	(1.152)
магнитная индукция в зубцах (Тл)	$B_{32(1/3)} = t_2 B_\delta / (b_{32(1/3)} k_c)$	(1.153)
напряженность магнитного поля (А/см)	$H_{32}$ – из приложения А (таблицы А.8 – А.10)	
При $B_{32\max} > 1,8$ Тл: зубцовое деление ротора (мм)	$t_2$ – по (1.69)	
зубцовое деление ротора в минимальном сечении зубца (мм)	$t_{2\min} = \pi(D_{н2} - 2h_{н2})/z_2$	(1.154)
ширина зубца (мм): в наиболее узкой части	$b_{32\min} = t_{2\min} - b_{н2}$	(1.155)
в наиболее широкой части	$b_{32\max} = t_2 - b_{н2}$	(1.156)
в средней части	$b_{32\text{ср}} = (b_{32\min} + b_{32\max})/2$	(1.157)
магнитная индукция в зубцах ротора (Тл): в наиболее узкой части	$B_{32\max}$ – по (1.91)	
в наиболее широкой части	$B_{32\min} = t_2 B_\delta / (b_{32\max} k_c)$	(1.158)
в средней части	$B_{32\text{ср}} = t_2 B_\delta / (b_{32\text{ср}} k_c)$	(1.159)
коэффициент зубцов в наиболее узкой части	$k_{32\max} = [t_{2\min} / (b_{32\min} k_c)] - 1$	(1.160)
в наиболее широкой части*	$k_{32\min} = [t_2 / (b_{32\max} k_c)] - 1$	(1.161)
в средней части*	$k_{32\text{ср}} = (k_{32\max} + k_{32\min})/2$	(1.162)
напряженность магнитного поля (А/см): в наиболее узкой части	из приложения А рисунки А.1 – А.3)	
в наиболее широкой части	$H_{32\min} = f(B_{32\min}, k_{32\min})$ – из приложения А (таблицы А.8 – А.10 или рисунки А.1 – А.3)	





Продолжение таблицы 1.34

в средней части	$H_{32cp} = f(B_{32cp}, k_{32cp}) -$ из приложения А (таблицы А.8 – А.10 или рисунки А.1 – А.3)	
среднее значение напряженности магнитного поля в зубцах (А / см)	$H_{32} = \frac{1}{6}(H_{32max} + 4H_{32cp} + H_{32min})$	(1.163)
Средняя длина пути (мм) магнитного потока	$L_{32} = h_{п2}$	(1.164)
МДС для зубцов (А)	$F_{32} = 0,1H_{32}L_{32}$	(1.165)
МДС для спинки статора		
Напряженность магнитного поля (А / см): при $2p = 2$ и $B_{c1} \leq 1,4$ Тл, а также при $2p \geq 4$	$H_{c1}$ – из приложения А (таблицы А.11 – А.13)	
при $2p = 2$ и $B_{c1} > 1,4$ Тл	$H_{c1}$ – из приложения А (таблицы А.5 – А.7); при этом значение $B_{c1}$ , выбранное из таблице 1.13, уменьшают на 0,4 Тл	
Средняя длина пути магнитного потока (мм)	$L_{c1} = \pi(D_{н1} - h_{c1})/(4p)$	(1.166)
МДС для спинки статора (А)	$F_{c1} = 0,1H_{c1}L_{c1}$	(1.167)
МДС для спинки ротора		
Напряженность магнитного поля (А/см): при $2p = 2$	$H_{c2}$ – из приложения А (таблицы А.11 – А.13)	
при $2p \geq 4$	$H_{c2}$ – из приложения А (таблицы А.5 – А.7)	
средняя длина пути магнитного потока (мм): при $2p = 2$	$L_{c2} = h_{c2} + 2d_{к2}/3$	(1.168)
при $2p \geq 4$	$L_{c2} = \pi \left( D_2 + h_{c2} + \frac{4}{3}d_{к2} \right) / (4p)$	(1.169)
МДС для спинки ротора (А)	$F_{c2} = 0,1H_{c2}L_{c2}$	(1.170)
Параметры магнитной цепи		
Суммарная ЭДС магнитной цепи на один полюс (А)	$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{31} + F_{32} + F_{c1} + F_{c2}$	(1.171)

Продолжение таблицы 1.34

Коэффициент насыщения магнитной цепи	$k_{\text{нас}} = F_{\Sigma} / F_{\delta}$	(1.172)
Намагничивающий ток (А)	$I_M = 2,22 F_{\Sigma} p / (m_1 \omega_1 k_{\text{о61}})$	(1.173)
То же, в относительных единицах ЭДС холостого хода (В)	$I_{M*} = I_M / I_1$	(1.174)
ЭДС холостого хода (В)	$E = k_n U_1$	(1.175)
Главное индуктивное сопротивление (Ом)	$x_M = E / I_M$	(1.176)
То же, в относительных единицах	$x_{M*} = x_M I_1 / U_1$	(1.177)

Таблица 1.35 – Пример расчета магнитной цепи

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1	Двигатель №2
166	$k_{\delta 1}$	(1.116)	$1 + \frac{3,5}{13,3 - 3,5 + 5} \times \frac{1}{0,35 \cdot 13,3 / 3,5} = 1,21$	$1 + \frac{5,5}{18,4 - 5,5 + 5 \cdot 0,9} \times \frac{1}{18,4 / 5,5} = 1,2$
167	$k_{\delta 2}$	(1.117)	$1 + \frac{1,5}{14 - 1,5 + 5} \times \frac{1}{0,35 \cdot 14 / 1,5} = 1,052$	$1 + \frac{1,5}{16,3 - 1,5 + 5 \cdot 0,9} \times \frac{1}{16,3 / 1,5} = 1,024$
168	$k_k$	§ 1.7	1	1
169	$k_{\delta}$	(1.120)	$1,21 \cdot 1,052 \cdot 1,0 = 1,27$	$1,2 \cdot 1,024 \cdot 1,0 = 1,23$
170	$F_{\delta}$ , А	(1.121)	$0,8 \cdot 0,35 \cdot 1,27 \cdot 0,9 \cdot 10^3 = 320$	$0,8 \cdot 0,9 \cdot 1,23 \cdot 0,875 \cdot 10^3 = 775$
171	$t_1$ (1 / 3), мм	(1.122)	$\pi (153 + 2 \cdot 18,5 / 3) / 36 = 14,4$	$\pi (422 + 2 \cdot 38 / 3) / 72 = 19,5$
172	$k_3$ (1 / 3)	(1.123)	$[14,4 / (6,67 \cdot 0,97)] - 1 = 1,23$	–
173	$H_{31}$ , А / см	приложение А (рисунок А.1)	15,2	–
174	$b_{31}$ (1 / 3), мм	(1.126)	–	$19,5 - 9,5 = 10$



Продолжение таблицы 1.35

175	$B_{31}$ (1 / 3), ТЛ	(1.127)	–	$18,4 \cdot 0,875 / (0,95 \cdot 10) = 1,69$
176	$H_{31}$ , А / см	приложение А (таблица А.9)	–	18,4
177	$L_{31}$ , мм	(1.124)	18,5	38
178	$F_{31}$ , А	(1.125)	$0,1 \cdot 15,2 \cdot 18,5 = 28,1$	$0,1 \cdot 18,4 \cdot 38 = 70$
179	$H_{32}$ , А / см	приложение А (таблица А.8)	11,5	–
180	$L_{32}$ , мм	(1.139)	$25,5 - 0,2 \cdot 1 = 25,3$	–
181	$F_{32}$ , А	(1.140)	$0,1 \cdot 11,5 \cdot 25,3 = 29$	–
182	$t_{2min}$ , мм	(1.154)	–	$\pi (420 \cdot 2 - 2 \cdot 44,3) / 81 = 12,9$
183	$b_{32min}$ , мм	(1.155)	–	$12,9 - 5,18 = 7,7$
184	$b_{32max}$ , мм	(1.156)	–	$16,3 - 5,18 = 11,1$
185	$b_{32cp}$ , мм	(1.157)	–	$(7,7 + 11,1) / 2 = 9,4$
186	$B_{32max}$ , ТЛ	(1.91)	–	$16,3 \cdot 0,875 / (7,7 \cdot 0,95) = 1,95$
187	$B_{32min}$ , ТЛ	(1.158)	–	$16,3 \cdot 0,875 / (11,1 \cdot 0,95) = 1,35$
188	$B_{32cp}$ , ТЛ	(1.159)	–	$16,3 \cdot 0,875 / (9,4 \cdot 0,95) = 1,6$
189	$k_{32max}$	(1.160)	–	$[12,9 / (7,7 \cdot 0,95)] - 1 = 0,76$
190	$H_{32max}$ , А / см	приложение А (рисунок А.2)	–	45
191	$H_{32min}$ , А / см	приложение А (таблица А.9)	–	8
192	$H_{32cp}$ , А / см	То же	–	14,5
193	$H_{32}$ , А / см	(1.163)	–	$\frac{(45 + 4 \cdot 14,5 + 8)}{6} = 18,5$
194	$L_{32}$ , мм	(1.164)	–	44,3
195	$F_{32}$ , А	(1.165)	–	$0,1 \cdot 18,5 \cdot 44,3 = 82$
196	$H_{c1}$ , А / см	приложение А (таблица А.11)	9,4	–

Продолжение таблицы 1.35

197	$H_{c1}$ , А / см	приложение А (таблица А.12)	–	10,9
198	$L_{c1}$ , мм	(1.166)	$\pi (233 - 21,4) / (4 \cdot 2) = 83,1$	$\pi (590 - 46) / (4 \cdot 3) = 142$
199	$F_{c1}$ , А	(1.167)	$0,1 \cdot 9,4 \cdot 83,1 = 78$	$0,1 \cdot 10,9 \cdot 142 = 155$
200	$H_{c2}$ , А / см	приложение А (таблица А.5)	0,7	–
201	$H_{c2}$ , А / см	приложение А (таблица А.6)	–	0,795
202	$L_{c2}$ , мм	(1.169)	$\pi (54 + 32,4) / (4 \cdot 2) = 33,9$	$\pi (140 + 88,7 + 4 \cdot 40 / 3) / (4 \cdot 3) = 73,8$
203	$F_{c2}$ , А	(1.170)	$0,1 \cdot 0,7 \cdot 33,9 = 2,4$	$0,1 \cdot 0,795 \cdot 73,8 = 5,9$
204	$F_{\Sigma}$ , А	(1.171)	$320 + 28,1 + 29 + 78 + 2,4 = 457,5$	$775 + 70 + 82 + 155 + 5,9 = 1088$
205	$k_{нас}$	(1.172)	$457,5 / 320 = 1,43$	$1088 / 775 = 1,4$
206	$I_M$ , А	(1.173)	$\frac{2,22 \cdot 457,5 \cdot 2}{3 \cdot 126 \cdot 0,96} = 5,6$	$\frac{2,22 \cdot 1088 \cdot 3}{3 \cdot 68 \cdot 0,886} = 40,1$
207	$I_{M*}$ о. е.	(1.174)	$5,6 / 15,2 = 0,37$	$40,1 / 171,5 = 0,234$
208	$E$ , В	(1.175)	$0,97 \cdot 220 = 213$	$0,98 \cdot 380 = 372,4$
209	$x_M$ , Ом	(1.176)	$213 / 5,6 = 38$	$372,4 / 40,1 = 9,3$
210	$x_{M*}$ , о. е.	(1.177)	$38 \cdot 15,2 / 220 = 2,63$	$9,3 \cdot 171,5 / 380 = 4,2$

## 1.8 Активные и индуктивные сопротивления обмоток

**Основные положения.** Определение активных и индуктивных сопротивлений статора и ротора – параметров схемы замещения асинхронной машины – необходимо для расчета режима х. х., номинальных параметров, рабочих и пусковых характеристик, а также построения круговых диаграмм.

Активные сопротивления рассчитывают для температуры 20<sup>0</sup>С, а при определении потерь их приводят к стандартной рабочей температуре по ГОСТ 183, как указано в [1], путем умножения их на коэффициент  $m_T$ .

При расчете индуктивных сопротивлений поле рассеяния условно разбивают на три составляющие: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Для каждой составляющей определяют магнитную

проводимость ( $\lambda_n$ ;  $\lambda_d$ ;  $\lambda_l$ ); суммируют эти проводимости и по ним рассчитывают индуктивное сопротивление.

Проводимость пазового рассеивания зависит от формы и размеров паза. В двухслойных обмотках с укороченным шагом в некоторых пазах располагаются катушки или стержни, принадлежащие разным фазам, вследствие чего потокоцепление такой обмотки уменьшается. Это явление учитывается введением в расчетные формулы коэффициентов  $k_{\beta 1}$  и  $k'_{\beta 1}$ , зависящих от  $\beta_1$ .

Проводимость дифференциального рассеяния обусловлена высшими гармониками. Высшие гармоники поля статора наводят токи в обмотке ротора; демпфирующую реакцию этих токов учитывают только при короткозамкнутом роторе. Скос пазов уменьшает демпфирующую реакцию токов.

Проводимость рассеяния лобовых частей обмотки зависит от количества пазов на полюс и фазу, длины лобовой части катушки и от укорочения шага обмотки.

При пуске асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, имеющим глубокие пазы или двойную клетку, в том числе и в виде бутылочного паза, возникает явление вытеснения тока в обмотке ротора, которое приводит к увеличению активного и уменьшению индуктивного сопротивления этой обмотки.

Кроме того, при пуске, а также в режимах работы от  $s=1$  до  $s_{\max}$  (соответствующем  $M_{\max}$ ) следует учитывать явление насыщения путем потоков рассеяния, которое зависит от величины токов, протекающих в пазах, и уменьшает индуктивные сопротивления статора и ротора. Таким образом, разным режимам работы двигателя – номинальному, пусковому и при  $M_{\max}$  – соответствуют различные значения  $r'_2$ ,  $x_1$  и  $x'_2$ .

В настоящем разделе приведены формулы для определения активных и индуктивных сопротивлений обмоток при температуре 20<sup>0</sup>С и без учета влияния явлений вытеснения тока в обмотке короткозамкнутого ротора и насыщения путей потоков рассеяния статора и ротора.

Активные и индуктивные сопротивления обмотки статора в относительных единицах ( $r_{1*}$ ,  $x_{1*}$ ) можно определить по разным формулам, но результат должен быть одинаков. Этим проверяется правильность определения  $r_1$  и  $x_1$ . О правильности расчета  $x'_2$  можно примерно судить по отношению  $x_1 / x'_2 = 0,7 \div 1,0$ .

**Сопротивление обмотки статора.** Расчет сопротивления обмотки статора проводят в последовательности, указанной в таблице 1.36.

Таблица 1.36 – Формулы для расчета сопротивления обмотки статора

Активное сопротивление обмотки фазы при 20°C (Ом)	$r_1 = \omega_1 l_{\text{ср1}} / (\rho_{M20} a_1 c s \cdot 10^3)$	(1.178)
То же (о. е.)	$r_{1*} = r_1 I_1 / U_1$	(1.179)
Проверка правильности определения $r_{1*}$ (о. е.)	$r_{1*} = \pi D_1 (A_1 J_1) l_{\text{ср1}} / (114 \cdot 10^4 m_1 U_1 I_1)$	(1.180)
Коэффициенты, учитывающие укорочение шага при $\beta_1 = 0,65 \div 1,0$	$k_{\beta 1} = 0,4 + 0,6\beta_1$	(1.181)
	$k'_{\beta 1} = 0,2 + 0,8\beta_1$	и (1.182)
при $\beta_1 < 0,65$	$k_{\beta 1} = 0,2 + 0,85\beta_1$	(1.183)
	$k'_{\beta 1} = 1,1\beta_1$	и (1.184)
Коэффициент проводимости рассеяния: для трапецидального полужакрытого паза (рисунок 1.7)	$\lambda_{\text{н1}} = \frac{h_1}{3b_2} k_{\beta 1} + \left( \frac{3h_{\text{к1}}}{b_2 + 2b_{\text{н1}}} + \frac{h_{\text{н1}}}{b_{\text{н1}}} + \frac{h_2}{b_2} \right) \cdot k'_{\beta 1}$	(1.185)
для прямоугольного полутракрытого паза (рисунок 1.9)	$\lambda_{\text{н1}} = \frac{h_3}{4b_{\text{н1}}} + \frac{h_1 - h_3}{3b_{\text{н1}}} k_{\beta 1} + \left( \frac{3h_{\text{к1}}}{b_{\text{н1}} + 2b_{\text{н1}}} + \frac{h_{\text{н1}}}{b_{\text{н1}}} + \frac{h_2}{b_{\text{н1}}} \right) \cdot k'_{\beta 1}$	(1.186)
для прямоугольного открытого паза (рисунок 1.9)	$\lambda_{\text{н1}} = \frac{h_3}{4b_{\text{н1}}} + \frac{h_1 - h_3}{3b_{\text{н1}}} k_{\beta 1} + \left( \frac{h_{\text{к1}} + h_{\text{н1}} + h_2}{b_{\text{н1}}} \right) \cdot k'_{\beta 1}$	(1.187)
Коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора на проводимость дифференциального рассеяния	$k_{\text{н1}} = 1 - \left[ 0,033 b_{\text{н1}}^2 / (t_{\text{1min}} \delta) \right]$	(1.188)
Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{\text{д1}} = 0,9 t_{\text{1min}} (q_1 k_{\text{о61}})^2 k_{\text{п1}} k_{\text{н1}} k_{\text{д1}} / (\delta k_{\delta})$	(1.189)
Полусное деление (мм)	$\tau = \pi D_1 / (2p)$	(1.190)
Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки	$\lambda_{\text{л1}} = 0,34 \frac{q_1}{l_1} (l_{\text{л1}} - 0,64\beta \tau_1)$	(1.191)
Коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора	$\lambda_1 = \lambda_{\text{н1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}$	(1.192)
Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора (Ом)	$x_1 = 1,58 f_1 l_1 \omega_1^2 \lambda_1 / (p_{q1} 10^8)$	(1.193)
Индуктивное сопротивление обмотки фазы статора (о. е.)	$x_{1*} = x_1 I_1 / U_1$	(1.194)
Проверка правильности определения $x_{1*}$ (о. е.)	$x_{1*} = 0,39 (D_1 A_1)^2 l_1 \lambda_1 \cdot 10^{-7} / (m_1 U_1 I_1 z_1)$	(1.195)



Здесь  $\rho_{м20} = 57 \text{ См / мкм}$  – удельная электрическая проводимость меди при  $20^\circ\text{C}$ ;  $h_{к1}$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  – размеры частей обмоток и паза (рисунок 1.7 и 1.9), определяемые по таблице 1.37; размер обмотки  $h_1 = h_{п1} - h_{ш1} - h_{к1} - h_2 - h_4$ ;  $k_{р1}$  – коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, наведенных в обмотке короткозамкнутого ротора высшими гармониками поля статора (для двигателей с фазным ротором  $k_{р1} = 1$ ; для двигателей с короткозамкнутым ротором значения  $k_{р1}$  приведены в таблице 1.38);  $k_{д1}$  – коэффициент дифференциального рассеяния статора, равный отношению суммы ЭДС, наведенных высшими гармониками поля статора, к ЭДС, наведенной первой гармоникой того же поля;  $k_{д1}$  определяют по таблице 1.39.

Таблица 1.37 – Размеры частей обмоток и паза

Форма паза статора	Высоты, мм			
	$h$	$h_{к1}$	$h_2$	$h_3; h_4$
Полузакрывтая	50 – 132	0,7	0,6	0
	160 – 250	1,0		0,4
	280 – 315	3,0		0,4
Полуоткрытая и открытая	280 – 355	3,0	1,9	1,0
	400 – 450	3,5	2,55	5,0

Таблица 1.38 – Значения  $k_{р1}$

$q_1$	$k_{р1}$ при следующих значениях $z_2 / p$						
	10	15	20	25	30	35	40
2	$\frac{0,99}{0,94}$	$\frac{0,95}{0,87}$	$\frac{0,9}{0,8}$	$\frac{0,88}{0,79}$	–	–	–
3	$\frac{0,98}{0,92}$	$\frac{0,93}{0,87}$	$\frac{0,88}{0,84}$	$\frac{0,85}{0,78}$	$\frac{0,81}{0,73}$	–	–
4	$\frac{0,95}{0,86}$	$\frac{0,90}{0,81}$	$\frac{0,84}{0,77}$	$\frac{0,80}{0,75}$	$\frac{0,77}{0,72}$	$\frac{0,72}{0,67}$	–
5	–	$\frac{0,87}{0,72}$	$\frac{0,77}{0,7}$	$\frac{0,75}{0,69}$	$\frac{0,72}{0,67}$	$\frac{0,70}{0,65}$	$\frac{0,66}{0,61}$
6	–	–	–	$\frac{0,7}{0,62}$	$\frac{0,66}{0,60}$	$\frac{0,62}{0,58}$	$\frac{0,57}{0,54}$
8	–	–	–	–	$\frac{0,54}{0,48}$	$\frac{0,53}{0,47}$	$\frac{0,51}{0,46}$

Примечания – 1. В числителе приведены значения  $k_{р1}$  при скосе пазов  $b_c = t_2$ , а в знаменателе – при отсутствии скоса пазов. 2. Для значений  $z_2 / p$ , отличающихся от приведенных в таблице и для дробных  $q_1$ , коэффициент следует определять интерполяцией.

Таблица 1.39 – Коэффициент дифференциального рассеяния статора  $k_{д1}$

$q_1$	Коэффициент $k_{д1}$		
	однослойная обмотка с диаметральным шагом	двухслойная обмотка с укороченным шагом для ротора	
		короткозамкнутого	фазного
1,5	–	0,045	0,470
2	0,0285	0,0235	0,0235
2,5	–	0,0170	0,0180
3	0,0141	0,0111	0,0111
4	0,0089	0,0062	0,0062
5	0,0065	0,0043	0,0043
6	0,0052	0,0030	0,0030
8	–	0,0021	0,0021

**Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами.** Расчет сопротивления обмотки ротора проводят в последовательности, указанной в таблице 1.40.

Таблица 1.40 – Формулы для расчета сопротивления обмотки ротора

Активное сопротивление стержня клетки при 20°C (Ом)	$r_{ст} = l_2 / (\rho_{a20} S_{ст} \cdot 10^3)$	(1.196)
Коэффициент приведения тока кольца к току стержня	$k_{пр2} = 2 \sin(\pi p / z_2)$ при $t_2 / (2p) \geq 6$ : $k_{пр2} = 2\pi p / z_2$	(1.197) и (1.198)
Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня при 20°C (Ом)	$r_{кл} = 2\pi D_{кл.ср} / (\rho_{a20} z_2 S_{кл} k_{пр2}^2 \cdot 10^3)$	(1.199)
Центральный угол скоса пазов (рад)	$\alpha_{ск} = 2 p t_1 \beta_{ск1} / D_1$	(1.200)
Коэффициент скоса пазов ротора	$k_{ск}$ – по рисунку 1.16	
Коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора	$k_{пр1} = \frac{4m_1}{z_2} \left( \frac{\omega_1 k_{сб1}}{k_{ск}} \right)^2$	(1.201)
Активное сопротивление обмотки при 20°C, приведенное к обмотке статора (Ом)	$r'_2 = k_{пр1} (r_{ст} + r_{кл})$	(1.202)
Активное сопротивление обмотки при 20°C,	$r'_{2*} = r'_2 I_1 / U_1$	(1.203)

приведенное к обмотке статора (о. е.)		
<i>Продолжение таблицы 1.40</i>		
Ток стержня ротора для рабочего режима (А)	$I_2 = \frac{2\omega_1 k_{\text{ос1}} P_2}{U_1 z_2} \frac{(0,2 + 0,8 \cos \varphi') 10^3}{\eta' \cos \varphi'}$	(1.204)
Коэффициент проводимости рассеяния: для овального полузакрытого паза ротора (рисунок 1.10, а)	$\lambda_{\text{п2}} = \frac{h_{\text{м2}}}{b_{\text{м2}}} + \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \left(1 - \frac{\pi r_1^2}{2S_{\text{ст}}}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\text{м2}}}{4r_1}$	(1.205)
для овального закрытого паза (рисунок 1.10, б)	$\lambda_{\text{п2}} = 1,12 \frac{h_2}{I_2} 10^3 + \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \times \left(1 - \frac{\pi r_1^2}{2S_{\text{ст}}}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\text{м2}}}{4r_1} + 0,3$	(1.206)
Количество пазов ротора на полюс и фазу	$q_2 = z_2 / (2pm_1)$	(1.8 а)
Коэффициент дифференциального рассеяния ротора	$k_{\text{д2}} = f(q_2) - \text{по рисунку 1.17}$	
Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{\text{д2}} = 0,9t_2(z_2/6p)^2 k_{\text{д2}} / (\delta k_{\delta})$	(1.207)
Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки	$\lambda_{\text{кл}} = \frac{2,9D_{\text{кл.ср}}}{z_2 l_2 k_{\text{нр2}}^2} \lg \frac{2,35D_{\text{кл.ср}}}{h_{\text{кл}} + l_{\text{кл}}}$	(1.208)
Относительный скос пазов ротора, в долях зубцового деления ротора	$\beta_{\text{ск2}} = \beta_{\text{ск}} t_1 / t_2$	(1.209)
Коэффициент проводимости рассеяния скоса пазов	$\lambda_{\text{ск}} = t_2 \beta_{\text{ск2}}^2 / (9,5 \delta k_{\delta} k_{\text{нас}})$	(1.210)
Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора	$\lambda_2 = \lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{кл}} + \lambda_{\text{ск}}$	(1.211)
Индуктивное сопротивление обмотки ротора (Ом)	$x_2 = 7,9 f_1 l_2 \lambda_2 \cdot 10^{-9}$	(1.212)
Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора (Ом)	$x'_2 = k_{\text{нр1}} x_2$	(1.213)
Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора (о. е.)	$x'_{2*} = x'_2 I_1 / U_1$	(1.214)
Проверка правильности определения $x'_2$	$x_1 / x'_2 \approx 0,7 \div 1,0$	(1.215)

Здесь  $\rho_{a20}$  – удельная электрическая проводимость алюминия при  $20^{\circ}\text{C}$  [при использовании для заливки беличьей клетки ротора алюминия А5 (обычно применяемый)  $\rho_{a20} = 27 \text{ См / мкм}$ , при использовании алюминиевого сплава АКМ12-4 (для асинхронных двигателей с повышенным скольжением)  $\rho_{a20} = 15 \text{ См / мкм}$ ].

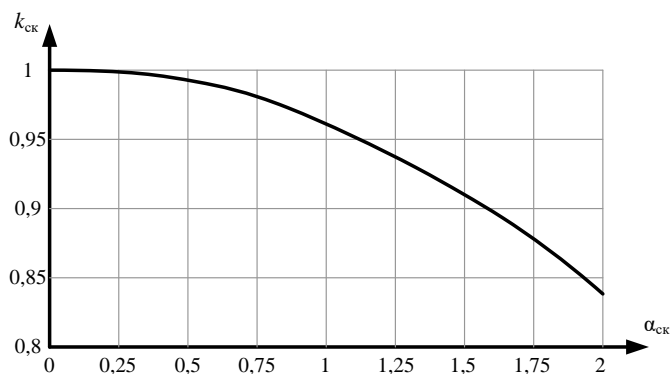


Рисунок 1.16 – Зависимость  $k_{\text{ск}} = f(\alpha_{\text{ск}})$

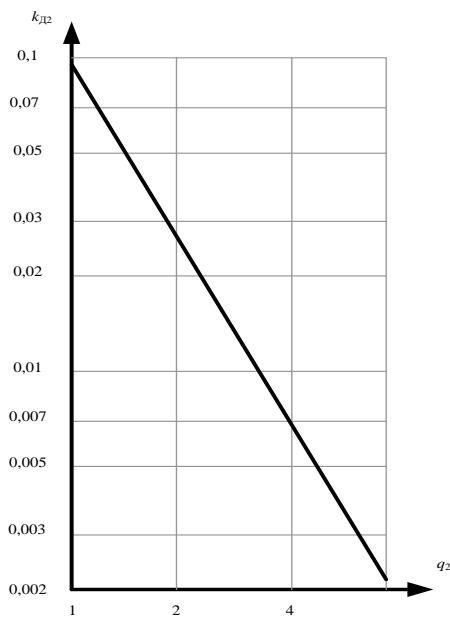


Рисунок 1.17 – Зависимость  $k_{\text{д2}} = f(q_2)$  для короткозамкнутого ротора

**Сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора с бутылочными закрытыми пазами.** На рисунке 1.18 приведена схема замещения ротора с бутылочными пазами. Обычно такие роторы выполняют без скоса пазов. Высота верхней части бутылочного паза  $h \leq 15$  мм; вытеснение тока при пуске двигателя в этой части паза можно не учитывать. Для нижней части паза расчет проводят так же, как для овального паза с заменой индексов (добавление в индексе буквы «н»).

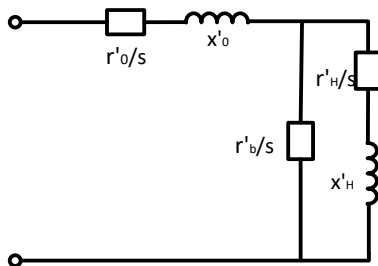


Рисунок 1.18 – Схема замещения ротора с бутылочными пазами

Расчет сопротивления обмотки ротора проводят в последовательности, указанной в таблице 1.41.

Таблица 1.41 – Формулы для расчета сопротивления обмотки ротора

Активное сопротивление верхней части стержня при 20 °С (Ом)	$r_{\text{ст.в}} = l_2 / (\rho_{\text{a20}} S_{\text{ст.в}} 10^3)$	(1.216)
Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня при 20 °С	$r_{\text{кл}}$ (Ом) – по (1.199)	
Активное сопротивление верхней части стержня, приведенное к статору, при 20 °С (Ом)	$r'_{\text{ст.в}} = k_{\text{пр1}} r_{\text{ст.в}}$	(1.217)
Активное сопротивление нижней части стержня, при 20 °С (Ом)	$r_{\text{ст.н}} = l_2 / (\rho_{\text{a20}} S_{\text{ст.н}} 10^3)$	(1.218)
Активное сопротивление нижней части стержня, приведенное к статору, при 20 °С (Ом)	$r'_{\text{ст.н}} = k_{\text{пр1}} r_{\text{ст.н}}$	(1.219)
Активное сопротивление короткозамыкающих колец (общей цепи ротора),	$r'_0 = k_{\text{пр1}} r_{\text{кл}}$	(1.220)

приведенное к статору, при 20 °С (Ом)		
Активное результирующее сопротивление ротора, при 20 °С (Ом)	$r'_2 = r'_o + \frac{r'_{\text{ст.В}} r'_{\text{ст.Н}}}{r'_{\text{ст.В}} + r'_{\text{ст.Н}}}$	(1.221)

Продолжение таблицы 1.41

Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda_{2н} = \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \left( 1 - \frac{\pi r_{21}^2}{2S_{ст.н}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b}{4r_1} + \frac{h - 0,18}{2b}$	(1.222)
Суммарный ток (А) верхней и нижней частей стержня	$I_2$ – по (1.204)	
Коэффициент проводимости рассеяния взаимной индукции нижнего и верхнего пазов	$\lambda_{н.в} = 1,12h_2 10^3 / I_2 + (h + 0,1b) / (2b) + 1,09$	(1.223)
Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{д2}$ – по (1.207)	
Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец	$\lambda_{кл}$ – по (1.208)	
Коэффициент проводимости рассеяния общей части ротора	$\lambda_{20} = \lambda_{н.в} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл}$	(1.224)
Приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda'_{2н} = \lambda_{2н} I_2 z_1 k_{06}^2 / (l_1 z_2)$	(1.225)
Приведенный коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора	$\lambda'_{20} = \lambda_{20} I_2 z_1 k_{06}^2 / (l_1 z_2)$	(1.226)
Индуктивное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору	$x'_H = x_1 \lambda'_{2н} / \lambda_1$	(1.227)
Индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору	$x'_0 = x_1 \lambda'_{20} / \lambda_1$	(1.228)
Индуктивное результирующее сопротивление	$x'_2 = x'_o + x'_H \left( \frac{S_{ст.н}}{S_{ст.н} + S_{ст.в}} \right)^2$	(1.229)
Активное приведенное результирующее сопротивление ротора	$r'_{2*}$ – по (1.203)	
Индуктивное приведенное результирующее сопротивление обмотки ротора	$x'_{2*}$ – по (1.214)	

**Сопrotивление обмотки короткозамкнутого ротора с прямоугольными открытыми пазами и сварной клеткой.** Расчет сопротивлений обмотки ротора с прямоугольными открытыми пазами и сварной клеткой проводят аналогично расчету для ротора с овальными пазами, но со следующими особенностями. При определении активного сопротивления стержня клетки необходимо в (1.196) добавить слагаемое, учитывающее сопротивление лобовых частей стержня (Ом)

$$r_{\text{ст.л}} = (l_{\text{ст}} - l_2) / (\rho_{a20} S_{\text{ст}} \cdot 10^3), \quad (1.230)$$

а также принять проводимость алюминиевых стержней при 20°C равной 30; поэтому в (1.196) в знаменателе следует подставить  $\rho_{a20} = 30$ .

Как правило, двигателя с прямоугольными открытыми пазами ротора и со сварной клеткой выполняются без скоса пазов; поэтому  $k_{\text{ск}} = 0$  и  $\lambda_{\text{ск}} = 0$ . Коэффициент проводимости рассеяния поля прямоугольного открытого паза

$$\lambda_{\Pi 2} = (h_{\Pi 2} - h_{\text{ш}2}) / (3b_{\Pi 2}) + h_{\text{ш}2} / b_{\Pi 2}. \quad (1.231)$$

Коэффициент проводимости рассеяния поля короткозамыкающих колец сварной клетки.

$$\lambda_{\text{кл}} = \frac{2,9D_{\text{кл.ср}}}{z_2 l_2 k_{\text{пр}}^2} \lg \frac{2,35D_{\text{кл.ср}}}{h_{\text{кл}} + l_{\text{кл}}}. \quad (1.232)$$

**Сопrotивление обмотки фазного ротора.** Расчет сопротивлений обмотки ротора проводят в последовательности, указанной в таблице 1.42.

**Таблица 1.42 – Формулы для расчета**

Активное сопротивление обмотки фазы при 20°C (Ом)	$r_2 = \omega_2 l_{\text{ср}2} / (\rho_{M20} S_{\text{ст}} a_2 \cdot 10^3)$	(1.233)
Коэффициент приведения обмотки ротора к обмотке статора	$k_{\text{пр}} = [\omega_1 k_{\text{о61}} / (\omega_2 k_{\text{о62}})]^2$	(1.234)
Активное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к обмотке статора (Ом)	$r_2' = k_{\text{пр}} r_2$	(1.235)
Активное сопротивление обмотки фазы ротора, приведенное к обмотке статора (о. е.)	$r_{2*}' - \text{по (1.203)}$	
Коэффициенты, учитывающие укорочение шага	$k_{\beta 1} - \text{по (1.181) или (1.183),}$ $a \ k_{\beta 1}' - \text{по (1.182) или (1.184)}$	



Продолжение таблицы 1.42

Коэффициент проводимости рассеяния паза	$\lambda_{n2} = \frac{h_3}{4b_{n2}} + \frac{h_1 - h_3}{3b_{n2}} k_{\beta 1} + \left( \frac{h_2}{b_{n2}} + \frac{3h_{m2}}{b_{n2} + 2b_{m2}} + \frac{h_{m2}}{b_{m2}} \right) k'_{\beta 1}$	(1.236)
Коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов ротора на проводимость дифференциального рассеяния	$k_{m2} = 1 - [0,033b_{m2}^2 / (t_2 / \delta)]$	(1.237)
Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{d2} = 0,9t_2(q_2k_{o\delta 2})^2 k_{m2}k_{d2} / (\delta k_{\delta})$	(1.238)
Полусное деление (мм)	$\tau_2 = \pi D_{n2} / (2p)$	(1.239)
Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки	$\lambda_{l2} = 0,34 \frac{q_2}{l_2} (l_{l2} - 0,64\beta\tau_2)$	(1.240)
Коэффициент проводимости рассеяния обмотки	$\lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{d2} + \lambda_{l2}$	(1.241)
Индуктивное сопротивление обмотки фазы ротора (Ом)	$x_2 = 1,58f_1l_2\omega_2^2\lambda_2 / (pq_2 \cdot 10^8)$	(1.242)
Индуктивное приведенное сопротивление обмотки фазы ротора (Ом)	$x'_2 = k_{пр}x_2$	(1.243)
Индуктивное приведенное сопротивление обмотки фазы ротора (о. е.)	$x'_{2*} - \text{по (1.214)}$	
Проверка правильности определения $x'_2$	$x_1 / x'_2 \approx 0,7 \div 1,0$	(1.215)

Здесь  $h_1, h_2, h_3, h_{k2}, h_{m2}, b_{n2}, b_{m2}$  – размеры частей обмоток и паза, обозначенные на рисунке 1.15. Указания по выбору размеров  $h_{k2}, h_{m2}, b_{m2}, b_{n2}, b_{ст}$  приведены в § 1.6; параметры  $h_2 = 1,1$  мм,  $h_4 = h_3 = 1,6$  мм (при  $U_k \leq 750$  В),  $h_2 = 1,7$  мм,  $h_4 = h_3 = 2,9$  мм (при  $U_k > 750$  В); размер обмотки  $h_1 = h_{n2} - h_{m2} - h_{k2} - h_2 - h_4$ ;  $k_{d2}$  – коэффициент дифференциального рассеяния, определенный по рисунку 1.19.

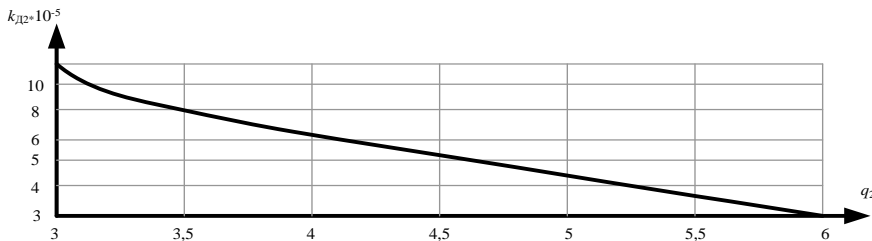


Рисунок 1.19 – Зависимость  $K_{d2}=f(q_2)$  для фазного ротора

**Сопrotивления обмоток преобразованной схемы замещения двигателя (с вынесенным на зажимы намагничивающим контуром).**

Для расчета различных режимов работы асинхронного двигателя удобнее пользоваться схемой замещения двигателя с вынесенным на зажимы намагничивающим контуром. При этом сопротивления обмоток двигателя  $r_1, x_1, r'_2, x'_2$ , определенные для Т-образной схемы замещения, должны быть преобразованы путем умножения на некоторые комплексные коэффициенты [1]. Кроме того, активные сопротивления статора и ротора должны быть умножены на коэффициент  $m_T$ , т. е. приведены к расчетной рабочей температуре, соответствующей классу нагревостойкости примененных изоляционных материалов и обмоточных проводов.

Введем следующие понятия: коэффициент рассеяния поля статора

$$\tau_1 = x_1 / x_M; \quad (1.244)$$

коэффициент сопротивления статора

$$\rho_1 = r_1 m_T / (x_1 + x_M). \quad (1.245)$$

Тогда преобразованные сопротивления обмоток статора и ротора

$$\left. \begin{aligned} r'_1 &= m_T r_1; \quad x'_1 = x_1 (1 + \tau_1) (1 + r_1 \rho_1 / x_1); \\ r''_2 &= m_T r'_2 (1 + \tau_1)^2 (1 + \rho_1^2); \quad x''_2 = x'_2 (1 + \tau_1)^2 (1 + \rho_1^2). \end{aligned} \right\} \quad (1.246)$$

Когда  $\rho_1 \leq 0,1$  (а также случаи встречаются достаточно часто), можно пользоваться упрощенными формулами

$$\left. \begin{aligned} r'_1 &= m_T r_1; \quad x'_1 = x_1 (1 + \tau_1); \\ r''_2 &= m_T r'_2 (1 + \tau_1)^2; \quad x''_2 = x'_2 (1 + \tau_1)^2. \end{aligned} \right\} \quad (1.247)$$

Значение коэффициента  $\tau_1$  позволяет определить необходимость повторного расчета магнитной цепи; это требуется при коэффициенте насыщения  $k_{\text{нас}} \geq 1,7$  и  $\tau_1 \geq 0,05$ . Тогда определяют ЭДС х. х. (В)

$$E_o = U_1 / \left[ (1 + \tau_1) \sqrt{1 + \rho_1^2} \right]. \quad (1.248)$$

Если  $E_o$  из (1.248) отличается от  $E = k_u U_1$  из (1.175) более чем на 3%, то повторяют расчет магнитной цепи по (1.116) – (1.177) при магнитных индукциях  $B_\delta, B_{31}, B_{32}, B_{c1}$  и  $B_{c2}$ , измененных пропорционально отношению  $E_o/E$ .

В таблице 1.43 приведен пример расчета активных и индуктивных сопротивлений обмоток.

Таблица 1.43 – Пример расчета активных и индуктивных сопротивлений обмоток

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1	Двигатель №2
211	$r_1$ , Ом	(1.178)	$\frac{126 \cdot 648}{57 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1,368 \cdot 10^3} = 0,524$	$\frac{68 \cdot 1094}{57 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 5,667 \cdot 10^3} = 0,0384$
212	$r_{1*}$ , о. е.	(1.179)	$0,524 \cdot 15,2 / 220 = 0,036$	$0,0384 \cdot 171,5 / 380 = 0,0173$
213	$r_{1*}$ , о. е.	(1.180)	$\frac{\pi \cdot 153(239 \cdot 5,56) \cdot 648}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 220 \cdot 15,2} = 0,036$	$\frac{\pi 422(528 \cdot 5,04) \cdot 1094}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 380 \cdot 171,5} = 0,0173$
214	размеры паза статора, мм	рисунок 1.7, § 1.4, таблица 1.37	$b_2 = 7,07; b_{ш1} = 3,5; h_{ш1} = 0,5; h_{к1} = 0,7; h_2 = 0,6; h_{п1} = 18,5; h_1 = 18,5 - 0,5 - 0,7 - 0,6 - 0 = 16,7$	—
215	$k_{\beta 1}$	(1.181)	1	—
216	$k'_{\beta 1}$	(1.182)	1	—
217	$\lambda_{П1}$	(1.185)	$\frac{16,7}{3 \cdot 7,07} 1 + (\frac{3 \cdot 0,7}{7,07 + 2 \cdot 3,5} + \frac{0,5}{3,5} + \frac{0,6}{7,07}) \cdot 1 = 1,16$	—
218	размеры паза статора, мм	рисунок 1.9, § 1.4, таблица 1.37	—	$b_{п1} = 9,5; b_{ш1} = 5,5; h_{ш1} = 1,0; h_{к1} = 3,0; h_2 = 1,9; h_3 = 1,0; h_{п1} = 38; h_1 = 38 - 1 - 3 - 1,9 - 1 = 31,1$
219	$k_{\beta 1}$	(1.181)	—	$0,4 + 0,6 \cdot 0,75 = 0,85$
220	$k'_{\beta 1}$	(1.182)	—	$0,2 + 0,8 \cdot 0,75 = 0,8$
221	$\lambda_{П1}$	(1.186)	—	$\frac{1}{4 \cdot 9,5} + \frac{31,1 - 1}{3 \cdot 9,5} 0,85 + (\frac{3 \cdot 3}{9,5 + 2 \cdot 5,5} + \frac{1}{5,5} + \frac{1,9}{9,5}) \times 0,8 = 1,55$
222	$k_{д1}$	таблица 1.39	0,0141	0,0062
223	$k_{ш1}$	(1.188)	$1 - \frac{0,033 \cdot 3,5^2}{13,3 \cdot 0,35} = 0,91$	$1 - \frac{0,033 \cdot 5,5^2}{18,8 \cdot 0,9} = 0,94$

Продолжение таблицы 1.43

224	$k_{p1}$	таблица 1.38	0,91	—
225	$\lambda_{Д1}$	(1.189)	$(0,9(13,3 \cdot 0,96)^2 \times$ $\times 0,91 \cdot 0,91 \cdot 0,0141) /$ $/(0,35 \cdot 1,27) = 3,85$	$(0,9(18,8 \cdot 0,886)^2 \times$ $\times 1 \cdot 0,94 \cdot 0,0062) /$ $/(0,9 \cdot 1,23) = 1,31$
226	$\tau$ , мм	(1.190)	$\pi \cdot 153 / 4 = 120$	$\pi \cdot 422 / 6 = 221$
227	$\lambda_{Л1}$	(1.191)	$0,34 \frac{3}{115} (209 - 0,64 \cdot 1 \cdot 120) = 1,17$	$0,34 \frac{4}{225} (322 - 0,64 \cdot 0,75 \cdot 220) = 1,3$
228	$\lambda_1$	(1.192)	$1,16 + 3,85 + 1,17 = 6,18$	$1,55 + 1,31 + 1,3 = 4,16$
229	$x_1$ , Ом	(1.193)	$\frac{1,58 \cdot 50 \cdot 115 \cdot 126^2}{2 \cdot 3 \cdot 10^8} \cdot 6,18 = 1,49$	$\frac{1,58 \cdot 50 \cdot 225 \cdot 68^2}{3 \cdot 4 \cdot 10^8} \cdot 4,16 = 0,285$
230	$x_1^*$ , о. е.	(1.194)	$1,49 \cdot 15,2 / 220 = 0,1$	$0,285 \cdot 171,5 / 380 = 0,13$
231	$x_1^*$ , о. е.	(1.195)	$\frac{0,39(153 \cdot 239)^2 \cdot 115}{3 \cdot 220 \cdot 15,2 \cdot 36} \times$ $\times 6,18 \cdot 10^{-7} = 0,1$	$\frac{0,39(422 \cdot 528)^2 \cdot 225}{3 \cdot 380 \cdot 177,5 \cdot 72} \times$ $\times 4,16 \cdot 10^{-7} = 0,13$
232	$r_{ст}$ , Ом	(1.196)	$115 / (27 \cdot 95,9 \cdot 10^3) =$ $= 4,44 \cdot 10^{-5}$	—
233	$k_{пр2}$	(1.198)	$2\pi \cdot 2 / 34 = 0,37$	—
234	$r_{кл}$ , Ом	(1.199)	$\frac{2\pi \cdot 121,7}{27 \cdot 34 \cdot 326 \cdot 0,37^2 \cdot 10^3} =$ $= 1,87 \cdot 10^{-5}$	—
235	$\alpha_{ск}$ , рад	(1.200)	$4 \cdot 13,3 / 153 = 0,35$	—
236	$k_{ск}$	рисунок 1.16	0,996	—
237	$k_{пр1}$	(1.201)	$\frac{4 \cdot 3}{34} \left( \frac{126 \cdot 0,96}{0,996} \right)^2 = 5206$	—
238	$r'_2$ , Ом	(1.202)	$5206 (4,44 + 1,87) \cdot 10^{-5} =$ $= 0,328$	—
239	$r'_2^*$ , о. е.	(1.203)	$0,328 \cdot 15,2 / 220 = 0,0227$	—
240	$I_2$ , А	(1.204)	$(2 \cdot 126 \cdot 0,96 \cdot 7,5 \times$ $\times (0,2 + 0,8 \cdot 0,86) \cdot 10^3) /$ $/(220 \cdot 34 \cdot 0,87 \cdot 0,86) = 288$	—

Продолжение таблицы 1.43

241	$\lambda_{н2}$	(1.205)	$\frac{0,75}{1,5} + \frac{20,8 + 0,8 \cdot 1}{6 \cdot 2,9} \left( 1 - \frac{2,9^2}{2 \cdot 95,9} \right)^2 +$ $+ 0,66 - \frac{1,5}{4 \cdot 2,9} = 1,95$	—
242	$q_2$	$q_2 = q_1 \pm 1$	$34 / 4 \cdot 3 = 2,8$	—
243	$k_{л2}$	рисунок 1.17	0,012	—
244	$\lambda_{л2}$	(1.207)	$\frac{0,9 \cdot 14 (34 / 6 \cdot 2)^2 \cdot 0,012}{0,35 \cdot 1,27} = 2,73$	—
245	$\lambda_{кл}$	(1.208)	$\frac{2,9 \cdot 121,7}{34 \cdot 115 \cdot 0,37^2} \times$ $\times \lg \frac{2,35 \cdot 121,7}{30,6 + 10,65} =$ $= 0,436$	—
246	$\beta_{ск2}$	(1.209)	$1 \cdot \frac{13,3}{14} = 0,95$	—
247	$\lambda_{ск}$	(1.210)	$\frac{14,0 \cdot 95^2}{9,5 \cdot 0,35 \cdot 1,27 \cdot 1,43} = 2,1$	—
248	$\lambda_2$	(1.211)	$1,95 + 2,73 + 0,436 + 2 = 7,2$	—
249	$x_2$ , Ом	(1.212)	$7,9 \cdot 50 \cdot 115 \cdot 7,2 \cdot 10^{-9} =$ $= 0,32 \cdot 10^{-3}$	—
250	$x'_2$ , Ом	(1.213)	$5206 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3} = 1,67$	—
251	$x'_{2*}$ , о. е.	(1.214)	$1,67 \cdot 15,2 / 220 = 0,115$	—
252	$x_1 / x'_2$ , о. е.	(1.215)	$1,48 / 1,67 = 0,886$	—
253	$r_2$ , Ом	(1.233)	—	$27 \cdot 1121 / (57 \cdot 58,56 \cdot 1 \cdot 10^3) =$ $= 0,009$
254	$k_{нр}$	(1.234)	—	$\left( \frac{68 \cdot 0,886}{27 \cdot 0,954} \right)^2 = 5,47$
255	$r'_2$ , Ом	(1.235)	—	$5,47 \cdot 0,009 = 0,049$
256	$r'_{2*}$ , о. е.	(1.203)	—	$0,049 \cdot 171,5 / 380 = 0,022$
257	$k_{\beta 2}$	(1.181)	—	$0,4 + 0,6 \cdot 0,962 = 0,977$
258	$k'_{\beta 2}$	(1.182)	—	$0,2 + 0,8 \cdot 0,962 = 0,97$

Продолжение таблицы 1.43

259	размеры паза ротора, мм	рисунок 1.15, таблица 1.37	—	$h_2 = 1,1 \text{ мм}; b_{м2} = 1,5 \text{ мм};$ $h_3 = 1,6 \text{ мм}; b_{п2} = 5,18 \text{ мм};$ $h_{к2} = 3,0 \text{ мм}; h_{м2} = 1 \text{ мм};$ $h_1 = 44,3 - 1 - 3,0 - 1,1 -$ $-1,6 = 37,6$
260	$\lambda_{п2}$	(1.236)	—	$\frac{1,6}{4 \cdot 5,18} + \frac{37,6 - 1,6}{3 \cdot 5,18} \cdot 0,977 +$ $\left( \frac{1,1}{5,18} + \frac{3,3}{5,18 + 2 \cdot 1,5} + \frac{1}{1,5} \right) \times$ $\times 0,97 = 4,28$
261	$k_{м2}$	(1.237)	—	$1 - \frac{0,033 \cdot 1,5^2}{16,3 \cdot 0,9} = 0,995$
262	$k_{л2}$	рисунок 1.19	—	0,0051
263	$\lambda_{л2}$	(1.238)	—	$(0,9 \cdot 16,3(4,5 \cdot 0,954)^2 \cdot 0,995 \cdot 0,0051) /$ $/ (0,9 \cdot 1,21) = 0,9$
264	$\tau_2$ , мм	(1.239)	—	$\pi 420,2 / 6 = 220$
265	$\lambda_{л2}$	(1.240)	—	$0,34(330,7 - 0,64 \cdot 0,963 \cdot 220) \times$ $\times \frac{4,5}{230} = 1,3$
266	$\lambda_2$	(1.241)	—	$4,28 + 0,9 + 1,3 = 6,48$
267	$x_2$ , Ом	(1.242)	—	$\frac{1,58 \cdot 50 \cdot 230 \cdot 27^2}{3 \cdot 4,5 \cdot 10^8} \times$ $\times 6,48 = 0,064$
268	$x'_2$ Ом	(1.243)	—	$5,47 \cdot 0,064 = 0,35$
269	$x'_2$ *, о. е.	(1.214)	—	$0,35 \cdot 171,5 / 380 = 0,16$
270	$x_1 / x'_2$	(1.215)	—	$0,27 / 0,35 = 0,77$
271	$\tau_1$	(1.244)	$1,49 / 38 = 0,04$	$0,285 / 9,3 = 0,03$
272	$\rho_1$	(1.245)	$0,524 \cdot 1,22 (1,49 + 38) =$ $= 0,016$	$0,0384 \cdot 1,38 / (0,285 + 9,3) =$ $= 0,0055$
273	$r'_1$ , Ом	(1.247)	$1,22 \cdot 0,524 = 0,64$	$1,38 \cdot 0,0384 = 0,053$
274	$x'_1$ , Ом	(1.247)	$1,49 (1 + 0,04) = 1,55$	$0,285 (1 + 0,03) = 0,294$
275	$r''_2$ , Ом	(1.247)	$1,22 \cdot 0,328 (1 + 0,04)^2 = 0,43$	$1,38 \cdot 0,049 (1 + 0,03)^2 = 0,07$
276	$x''_2$ , Ом	(1.247)	$1,67 (1 + 0,04)^2 = 1,8$	$0,35 (1 + 0,03)^2 = 0,37$
Примечание – Пересчет магнитной цепи не требуется, так как $k_{нас} < 1,7$ , а $\tau_1 < 0,05$ .				

## 1.9 Режимы холостого хода и номинальный

Для режима х. х. должны быть определены ток и потери, а также коэффициент мощности.

Магнитные потери в зубцах статора (Вт)

$$P_{31} = 1,7 p_{1/50} (f_1 / 50)^\beta B_{31cp}^2 m_{31}. \quad (1.249)$$

При подстановке в (1.249) значений  $p_{1/50}$  и  $\beta$  для разных марок стали при  $f_1 = 50$  Гц можно получить:

– для стали 2013

$$P_{31} = 4,4 B_{31cp}^2 m_{31}; \quad (1.250)$$

– для стали 2312

$$P_{31} = 3 B_{31cp}^2 m_{31}; \quad (1.251)$$

– для стали 2411

$$P_{31} = 2,7 B_{31cp}^2 m_{31}. \quad (1.252)$$

Если при определении МДС для прямоугольных открытых или полуоткрытых пазов статора  $B_{31max} \leq 1,8$  Тл, что не потребовало определения  $B_{31cp}$ , то следует рассчитать  $B_{31cp}$ , пользуясь (1.128) – (1.130) и (1.132).

Магнитные потери в спинке статора (Вт):

$$P_{c1} = 1,7 p_{1/50} (f_1 / 50)^\beta B_{c1}^2 m_{c1}, \quad (1.253)$$

где  $m_{c1}$  – масса спинки статора.

При подстановке в (1.253) значений  $p_{1/50}$  и  $\beta$  для разных марок стали при  $f_1 = 50$  Гц можно получить:

– для стали 2013

$$P_{c1} = 4,4 B_{c1}^2 m_{c1}; \quad (1.254)$$

– для стали 2312

$$P_{c1} = 3 B_{c1}^2 m_{c1}; \quad (1.255)$$

– для стали 2411

$$P_{c1} = 2,7 B_{c1}^2 m_{c1}. \quad (1.256)$$

Если  $\rho_1 \leq 0,1$ , то при расчете режимов х. х. и номинального, а также при расчете рабочих характеристик можно считать  $\rho_1^2 \approx 0$ .

Расчет режима х. х. проводят в последовательности, указанной в таблице 1.44.

Таблица 1.44 – Формулы для расчета режима холостого хода

Реактивная составляющая тока статора при синхронном вращении (А)	$I_{c.p} = U_1 / [x_m (1 + \tau_1) (1 + \rho_1^2)]$	(1.257)
Электрические потери в обмотке статора при синхронном вращении (Вт)	$P_{c.M1} = m_1 I_{c.p}^2 r_1' (1 + \rho_1^2)$	(1.258)
Расчетная масса стали зубцов статора при трапецеидальных пазах (кг)	$m_{31} = 7,8 z_1 b_{31} h_{\Pi 1} l_1 k_c \cdot 10^{-6}$	(1.259)
То же при прямоугольных пазах	$m_{31} = 7,8 z_1 b_{31cp} h_{\Pi 1} l_1 k_c \cdot 10^{-6}$	(1.260)
Магнитные потери в зубцах статора (Вт)	$P_{31} - \text{по (1.250), по (1.251) или по (1.252)}$	
Масса стали спинки статора (кг)	$m_{c1} = 7,8 \pi (D_{H1} - h_{c1}) h_{c1} l_1 k_c \cdot 10^{-6}$	(1.261)
Магнитные потери в спинке статора (Вт)	$P_{c1} - \text{по (1.254), (1.255) или (1.256)}$	
Суммарные магнитные потери в сердечнике статора, включающие добавочные потери в стали (Вт)	$P_{c\Sigma} = P_{31} \left[ 1 + 2 \sqrt{\frac{t_1}{10}} (k_\delta - 1)^2 \right] + P_{c1}$	(1.262)
Механические потери (Вт) при степени защиты и радиальной системе вентиляции; IP23, способе охлаждения IC01; без радиальных вентиляционных каналов	$P_{MX\Sigma} = k_{MX} (n_1 / 1000)^2 (D_1 / 100)^3$ $k_{MX} = 5,5 \text{ при } 2p = 2$ $k_{MX} = 6,5 \text{ при } 2p \geq 4$	(1.263)
с радиальными вентиляционными каналами	$P_{MX\Sigma} = (n_k + 11) (n_1 / 1000)^2 (D_1 / 100)^3$	(1.264)
То же, при степени защиты IP44, способе охлаждения IC0141	$P_{MX\Sigma} = k_{MX} (n_1 / 1000)^2 (D_{H1} / 100)^4$ $k_{MX} = 1,3 (1 - D_{H1} / 1000) \text{ при } 2p = 2$ $k_{MX} = 1,0 \text{ при } 2p \geq 4$	(1.265)
То же, при степени защиты IP44, способе охлаждения IC0151	$P_{MX\Sigma} = (n_k + 11) (n_1 / 1000)^2 (D / 100)^3 + (n_1 / 1000)^2 (0,6 D_{H1} / 100)^4$	(1.266)
Активная составляющая тока холостого хода (А)	$I_{oa} = (P_{c.M1} + P_{c\Sigma} + P_{MX}) / (m_1 U_1)$	(1.267)
Ток холостого хода (А)	$I_0 = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{c.p}^2}$	(1.268)
Коэффициент мощности при	$\cos \varphi_0 = I_{oa} / I_0$	(1.269)



холостом ходе		
---------------	--	--

Параметры номинального режима работы и рабочие характеристики могут быть получены аналитически и по круговой диаграмме. В последнее время в связи с широким использованием ЭВМ большее применение находят аналитические способы. Предлагаемая методика аналитического расчета разработана профессором Т. Г. Сорокером. На рисунке 1.20 приведена преобразованная схема замещения асинхронного двигателя с эквивалентным сопротивлением:

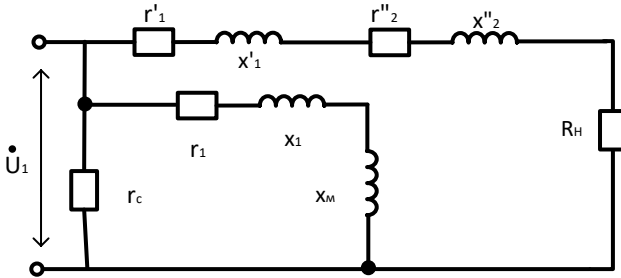


Рисунок 1.20 – Преобразованная схема замещения АД с  $R_H$

$$R_H = r_2''(1/s - 1). \quad (1.270)$$

Расчет параметров номинального режима работы проводят в последовательности, указанной в таблице 1.45, а в таблице 1.46 приведен пример расчета холостого хода и номинального режима.

Таблица 1.45 – Формулы для расчета параметров номинального режима

Активное сопротивление короткого замыкания (Ом)	$r_k = r_1' + r_2''$	(1.271)
Индуктивное сопротивление короткого замыкания (Ом)	$x_k = x_1' + x_2''$	(1.272)
Полное сопротивление короткого замыкания (Ом)	$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$	(1.273)
Добавочные потери при номинальной нагрузке (Вт)	$P_d = 0,005P_2 \cdot 10^3 / \eta'$	(1.274)
Механическая мощность двигателя (Вт)	$P_2' = P_2 \cdot 10^3 + P_{mx} + P_d$	(1.275)
Эквивалентное сопротивление замещения (Ом)	$R_H = m_1 U_1^2 / (2P_2') - r_k + \sqrt{\left( \frac{m_1 U_1^2}{2P_2'} - r_k \right)^2 - z_k^2}$	(1.270a)
Полное сопротивление схемы замещения (Ом)	$z_H = \sqrt{(R_H + r_k)^2 + x_k^2}$	(1.276)

Проверка правильности расчетов $R_H$ и $z_H$ (Ом <sup>-1</sup> )	$R_H / z_H^2 = P'_2 / (m_1 U_1^2)$	(1.277)
--	------------------------------------	---------

Продолжение таблицы 1.45

Скольжение (о. е.)	$s_H = 1 / (1 + R_H / r_2'')$	(1.278)
Активная составляющая тока статора при синхронном вращении (А)	$I_{ca} = (P_{CM1} + P_{C\Sigma}) / (m_1 U_1)$	(1.279)
Ток ротора (А)	$I_2'' = U_1 / z_H$	(1.280)
Ток статора (А): – активная составляющая	$I_{a1} = I_{ca} + I_2'' \left( \frac{R_H + r_k}{z_H} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_k}{z_H} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right)$	(1.281)
– реактивная составляющая	$I_{p1} = I_{op} + I_2'' \left( \frac{x_k}{z_H} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{R_H + r_k'}{z_H} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right)$	(1.282)
– фазный	$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}$	(1.283)
Коэффициент мощности	$\cos \varphi = I_{a1}^2 / I_1^2$	(1.284)
Линейная нагрузка статора (А / см)	$A_1 = 10 I_1 N_{\Pi\Pi} / (a_1 t_1)$	(1.285)
Плотность тока в обмотке статора (А / мм <sup>2</sup> )	$J_1$ – по (1.39)	
Линейная нагрузка ротора (А / см)	$A_2 = A_1 I_2'' k_{o61} \sqrt{1 + \rho_1^2} (1 + \tau_1) / (I_1 k_{o62} k_{ck})$ , для короткозамкнутого ротора $k_{o62} = 1$	(1.286)
Ток в стержне короткозамкнутого ротора (А)	$I_{ct} = I_2'' 2 m_1 \omega_1 k_{o61} (1 + \tau_1) \sqrt{1 + \rho_1^2} / (z_2 k_{ck})$	(1.287)
Плотность тока в стержне короткозамкнутого ротора (А / мм <sup>2</sup> )	$J_{ct} = I_{ct} / s_{ct}$	(1.288)
Ток в короткозамыкающем кольце (А)	$I_{кл} = I_{ct} / k_{np2}$	(1.289)
Ток в верхней части стержня ротора с бутылочными пазами (А)	$I_{ct.B} = I_{ct} [1 - r_B' / (r_B' + r_H')]$	(1.290)
То же, в нижней части	$I_{ct.H} = I_{ct} [r_B' / (r_B' + r_H')]$	(1.291)
Ток (фазный) фазного ротора (А)	$I_2 = I_2'' \left[ \omega_1 k_{o61} (1 + \tau_1) \sqrt{1 + \rho_1^2} \right] / (\omega_1 k_{o62})$	(1.292)

Плотность тока в обмотке фазного ротора (А / мм <sup>2</sup> )	$J_2 = I_2 / (c_2 s_{\text{ст}} a_2)$	(1.293)
---	---------------------------------------	---------

Продолжение таблицы 1.45

Электрические потери в обмотке статора и ротора (Вт) соответственно	$P_{M1} = m_1 I_1^2 r_1'$ $P_{M2} = m_1 I_2''^2 r_2''$	(1.294) (1.295)
Суммарные потери в электродвигателе (Вт)	$P_{\Sigma} = P_{M1} + P_{M2} + P_{C\Sigma} + P_{MX} + P_D$	(1.296)
Подводимая мощность (Вт)	$P_1 = P_2 \cdot 10^3 + P_{\Sigma}$	(1.297)
Коэффициент полезного действия (%)	$\eta = (1 - P_{\Sigma} / P_1) 100$	(1.298)
Подводимая мощность (Вт)	$P_1 = m_1 I_{a1} U_1$	(1.299)
Правильность вычислений (с точностью до округлений) по (1.299) и (1.297) подтверждается их равенством	–	
Мощность $P_2$ по (1.300) должна соответствовать заданной в § 1.2	$P_2 = m_1 I_1 U_1 \frac{\eta}{100} \cos \varphi$	(1.300)

Таблица 1.46 – Пример расчета холостого хода и номинального режима

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1	Двигатель №2
277	$I_c$ , А	(1.257)	$220 / [38,4 (1 + 0,04)] = 5,57$	$380 / 9,3 (1 + 0,03) = 39,7$
278	$P_c$ , мВт	(1.258)	$3 \cdot 5,57^2 \cdot 0,64 = 59,57$	$3 \cdot 39,7^2 \cdot 0,053 = 250,6$
279	$m_{\Sigma 1}$ , кг	(1.259)	$7,8 \cdot 36 \cdot 6,67 \cdot 18,5 \cdot 115 \cdot 0,97 \times 10^6 = 3,87$	–
280	$P_{\Sigma 1}$ , Вт	(1.250)	$4,4 \cdot 1,85^2 \cdot 3,9 = 58,6$	–
281	$t_{1max}$ , мм	(1.128)	–	$\pi(422 + 2 \cdot 38) / 72 = 21,7$
282	$b_{\Sigma 1max}$ , мм	(1.129)	–	$21,7 - 9,5 = 12,2$
283	$b_{\Sigma 1c.p.}$ , мм	(1.130)	–	$(9,3 + 12,2) / 2 = 10,75$
284	$B_{\Sigma 1cp}$ , Тл	(1.132)	–	$18,40,875 / (10,75 \cdot 0,95) = 1,58$
285	$m_{\Sigma 1}$ , кг	(1.260)	–	$7,8 \cdot 72 \cdot 10,75 \cdot 38 \cdot 225 \cdot 0,95 \times 10^6 = 49$
286	$P_{\Sigma 1}$ , Вт	(1.251)	–	$3 \cdot 1,58^2 \cdot 49 = 367$
287	$m_{c1}$ , кг	(1.261)	$7,8 \pi (233 - 21,4) 21,4 \cdot 115 \times 0,97 \cdot 10^{-6} = 12,4$	$7,8 \pi (590 - 46) 46 \cdot 225 \times 0,95 \cdot 10^{-6} = 131$
288	$P_{c1}$ , Вт	(1.254)	$4,4 \cdot 1,65^2 \cdot 12,4 = 148,5$	–
289	$P_{c1}$ , Вт	(1.255)	–	$3 \cdot 1,55^2 \cdot 131 = 944$



Продолжение таблицы 1.46

290	$P_{C\Sigma}, \text{ ВТ}$	(1.262)	$58,6 \left[ 1 + 2\sqrt{13,3(1,27-1)^2 / 10} \right] + 148,5 = 243,6$	$367 \left[ 1 + 2\sqrt{18,4(1,23-1)^2 / 10} \right] + 944 = 1537$
291	$P_{\text{мх}\Sigma}, \text{ ВТ}$	(1.265)	$1 \cdot (1500 / 1000)^2 (233 / 100)^4 = 66,3$	–
292	$P_{\text{мх}\Sigma}, \text{ ВТ}$	(1.263)	–	$6,5 (1000 / 1000)^2 (422 / 100)^3 = 488$
293	$I_{\text{оа}}, \text{ А}$	(1.267)	$\frac{(59,57 + 243,6 + 66,3)}{3 \cdot 220} = 0,56$	$\frac{(250,6 + 1537 + 488)}{3 \cdot 380} = 2$
294	$I_{\text{o}}, \text{ А}$	(1.268)	$\sqrt{0,56^2 + 5,57^2} = 5,6$	$\sqrt{2^2 + 39,7^2} = 39,75$
295	$\cos \varphi_0$	(1.269)	$0,56 / 5,6 = 0,1$	$2 / 39,75 = 0,05$
296	$r_{\text{к}}, \text{ Ом}$	(1.271)	$0,64 + 0,43 = 1,07$	$0,053 + 0,07 = 0,123$
297	$x_{\text{к}}, \text{ Ом}$	(1.272)	$1,55 + 1,8 = 3,35$	$0,294 + 0,37 = 0,664$
298	$z_{\text{к}}, \text{ Ом}$	(1.273)	$\sqrt{1,07^2 + 3,35^2} = 3,52$	$\sqrt{0,123^2 + 0,664^2} = 0,675$
299	$P_{\text{д}}, \text{ ВТ}$	(1.274)	$0,005 \cdot 7,5 \cdot 10^3 / 0,87 = 43$	$0,005 \cdot 160 \cdot 10^3 / 0,93 = 860$
300	$P'_2, \text{ ВТ}$	(1.275)	$7,5 \cdot 10^3 + 66,3 + 43 = 7610$	$160 \cdot 10^3 + 488 + 860 = 161350$
301	$R_{\text{н}}, \text{ Ом}$	(1.270)	$\sqrt{\left( \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 7610} - 1,07 \right)^2} - 3,52^2 + \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 7610} - 1,07 = 16,17$	$\sqrt{\left( \frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 161350} - 0,123 \right)^2} - 0,675^2 + \frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 161350} - 0,123 = 2,24$
302	$z_{\text{н}}, \text{ Ом}$	(1.276)	$\sqrt{(16,17 + 1,07)^2 + 3,35^2} = 17,56$	$\sqrt{(2,24 + 0,123)^2 + 0,664^2} = 2,45$
303	проверка, $\text{Ом}^{-1}$	(1.277)	$\frac{16,17}{17,56^2} = 0,0524$ $\frac{7610}{3 \cdot 220^2} = 0,0524$	$\frac{2,24}{2,45^2} = 0,373$ $\frac{161350}{3 \cdot 380^2} = 0,373$
304	$s_{\text{н}}, \text{ о. е.}$	(1.278)	$\frac{1}{1 + 16,17 / 0,43} = 0,026$	$\frac{1}{1 + 2,24 / 0,07} = 0,03$
305	$I_{\text{с. а}}, \text{ А}$	(1.279)	$(59,57 + 243,6) / (3 \cdot 220) = 0,46$	$(250,6 + 1537) / (3 \cdot 380) = 1,57$
306	$I''_2, \text{ А}$	(1.280)	$220 / 17,56 = 12,5$	$380 / 2,45 = 155$
307	$I_{\text{а1}}, \text{ А}$	(1.281)	$12,5 \left( \frac{16,17 + 1,07}{17,56} + \frac{3,35}{17,56} 2 \cdot 0,016 \right) + 0,46 = 12,8$	$155 \left( \frac{2,24 + 0,123}{2,45} + \frac{0,664}{2,45} 2 \cdot 0,0055 \right) + 1,57 = 151$

Продолжение таблицы 1.46

308	$I_{p1}, A$	(1.282)	$12,5 \left( \frac{3,35}{17,56} - \frac{16,17 - 1,07}{17,56} \cdot 2 \cdot 0,016 \right) +$ $+ 5,57 = 7,61$	$155 \left( \frac{0,664}{2,45} - \frac{2,24 - 0,123}{2,45} \cdot 2 \cdot 0,0055 \right) +$ $+ 39,7 = 80,2$
309	$I_1, A$	(1.283)	$\sqrt{12,8^2 + 7,61^2} = 14,9$	$\sqrt{151^2 + 80,2^2} = 171$
310	$\cos \varphi_0$	(1.284)	$12,8 / 14,9 = 0,86$	$151 / 171 = 0,88$
311	$A_1, A / \text{см}$	(1.285)	$\frac{10 \cdot 14,9 \cdot 21}{1 \cdot 13,3} = 235$	$\frac{10 \cdot 171 \cdot 17}{3 \cdot 18,4} = 527$
312	$J_1, A / \text{мм}^2$	(1.41)	$14,9 / (2 \cdot 1,368 \cdot 1) = 5,5$	$171 / (2 \cdot 5,667 \cdot 3) = 5,03$
313	$A_2, A / \text{см}$	(1.286)	$235 \frac{12,5 \cdot (1 + 0,04) 0,96}{14,9 \cdot 1 \cdot 0,996} = 197,6$	$527 \frac{155 \cdot (1 + 0,03) 0,866}{171 \cdot 1 \cdot 0,954} = 457$
314	$I_{ст}, A$	(1.287)	$12,5 \frac{2 \cdot 3 \cdot 126 \cdot 0,96 \cdot 1,04}{34 \cdot 0,996} = 279$	–
315	$J_{ст}, A / \text{мм}^2$	(1.288)	$279 / 95,9 = 2,9$	–
316	$I_{кл}, A$	(1.289)	$279 / 0,37 = 754$	–
317	$I_2, A$	(1.292)	–	$155 \frac{68 \cdot 0,886}{27 \cdot 0,954} (1 + 0,04) = 377$
318	$J_2, A / \text{мм}^2$	(1.293)	–	$377 / (1 \cdot 58,56 \cdot 1) = 6,44$
319	$P_{м1}, \text{Вт}$	(1.294)	$3 \cdot 14,9^2 \cdot 0,64 = 426$	$3 \cdot 171^2 \cdot 0,053 = 4649$
320	$P_{м2}, \text{Вт}$	(1.295)	$3 \cdot 12,5^2 \cdot 0,43 = 202$	$3 \cdot 155^2 \cdot 0,07 = 5045$
321	$P_{\Sigma}, \text{Вт}$	(1.296)	$426 + 202 + 243,6 + 66,4 +$ $+ 43 = 981$	$4649 + 5045 + 1537 + 488 +$ $+ 860 = 12580$
322	$P_1, \text{Вт}$	(1.297)	$7,5 \cdot 10^3 + 981 = 8480$	$160 \cdot 10^2 + 12580 = 172600$
323	$\eta, \%$	(1.298)	$(1 - 981 / 8480) 100 = 88,4$	$1 - 12580 / 172600) 100 = 92,7$
324	Проверка $P_1, \text{Вт}$ $P_2, \text{Вт}$	(1.299) (1.300)	$3 \cdot 12,8 \cdot 220 = 8450$ $3 \cdot 14,9 \cdot 220 \frac{88,4}{100} 0,86 = 7500$	$3 \cdot 151 \cdot 380 = 172140$ $3 \cdot 171 \cdot 380 \frac{92,7}{100} 0,88 = 160000$

### 1.10 Круговая диаграмма и рабочие характеристики

Рабочими характеристиками называют зависимости  $I_1$ ;  $\eta$ ;  $\cos \varphi$  и  $s = f(P_2)$ . Они могут быть рассчитаны аналитически или определены по круговой диаграмме. Даже если рабочие характеристики определяют аналитически, то построение круговой диаграммы желательно, так как она дает наглядное представление об особенностях спроектированного двигателя.

Расчет и построение круговой диаграммы проводят в представленной ниже последовательности (рисунок 1.21).

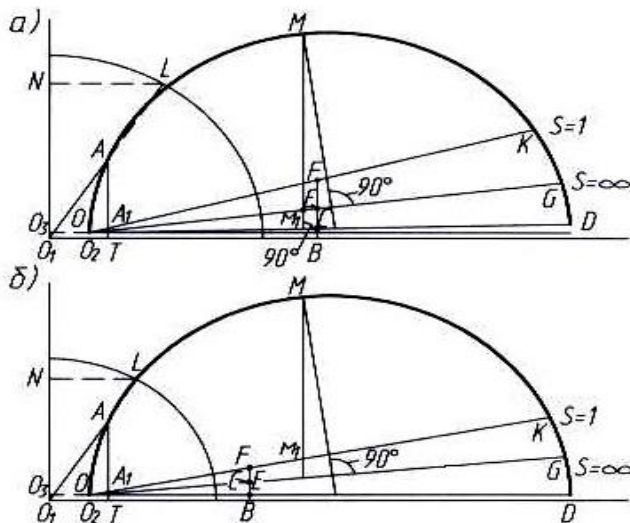


Рисунок 1.21 – Круговые диаграммы:  
а – двигатель №1; б – №2

Выбирают масштаб тока  $c_I$  таким, чтобы диаметр рабочего круга диаграммы был в пределах 200 – 300 мм. Определяют диаметр рабочего круга (мм):

$$D_a = U_1 / (c_I x_k). \quad (1.301)$$

Определяют масштаб мощности (кВт / мм):

$$c_p = m_1 U_1 c_I \cdot 10^{-3}. \quad (1.302)$$

От начала прямоугольных координат (точка  $O_1$ ) вдоль оси абсцисс откладывают (в масштабе тока): отрезок  $O_1 O_2$ , равный  $I_{c.p}$  (1.257), по оси ординат – отрезок  $O_1 O_3$ , равный  $I_{c.з}$  (1.279). Конец вектора тока, построенного по этим составляющим, дает точку  $O$ . Из этой точки проводят прямую, параллельную оси абсцисс. На ней откладывают отрезок  $OB = 100$  мм. Из точки  $B$  проводят перпендикуляр к оси абсцисс и на нем откладывают отрезки (мм).

$$BC = 2r_1 \cdot 100; \quad BE = r'_1 \cdot 100 / x_k; \quad BF = r_k \cdot 100 / x_k. \quad (1.303)$$

Через точки  $O$  и  $C$  проводят линию, на которой откладывают отрезок  $OD$ , равный диаметру рабочего круга  $D_a$ . На диаметре  $OD$  строят окружность круговой диаграммы. Через  $O$  и  $E$  проводят прямую до пересечения с окружностью в точке  $G$ ; эта точка соответствует



скольжению  $s = \infty$ . Прямая  $OG$  – линия электромагнитных моментов или мощностей. Через точку  $O$  и  $F$  проводят прямую до пересечения с окружностью в точке  $K$ ; эта точка соответствует  $s = 1$ . Прямая  $OK$  является линией механических мощностей  $P'_2$ . Для построения вспомогательной окружности, облегчающей определение  $\cos\varphi$ , из точки  $O_1$  радиусом 100 мм проводится четверть окружности. Для определения на круговой диаграмме точки, соответствующей номинальной мощности, следует найти на окружности токов точку  $A$ , расстояние от которой до линии механических мощностей по линии  $AA_1$ , перпендикулярной диаметру  $OD$ , равно  $P'_2$  [по (1.275)] (в масштабе мощности  $s_P$ ).

Коэффициент мощности можно определить следующим образом: продлить вектор тока статора (для заданного значения отдаваемой мощности) до пересечения со вспомогательной окружностью в точке  $L$ ; из точки  $L$  провести линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения оси ординат в точке  $N$ ; отрезок  $O_1N / 100$  (мм) дает значение  $\cos\varphi$ .

Для определения отрезка, соответствующего максимальному моменту (без учета явлений насыщения путей потоков рассеяния и без учета явления вытеснения тока), необходимо выполнить следующие построения. Из центра круговой диаграммы (середина отрезка  $OD$ ) провести линию, перпендикулярную линии моментов  $OG$ , до пересечения с окружностью в точке  $M$ . Из этой точки опустить перпендикуляр к линии диаметров до пересечения с линией моментов в точке  $M_1$ . Отрезок  $MM_1$  (в масштабе мощности) определяет величину максимального момента.

В таблице 1.47 приведен пример расчета рабочих характеристик.

Таблица 1.47 – Результаты расчета рабочих характеристик

Условные обозначе ния	Источни к	Отдаваемая мощность в долях от номинальной $P_2$				
		$0,25P_2$	$0,5P_2$	$0,75P_2$	$P_2$	$1,25P_2$
Результаты расчета рабочих характеристик двигателя №1						
$P_2$ , кВт	здание	1,875	3,75	5,625	7,5	9,375
$P_d$ , Вт	(1.274)	12	22	33	43	55
$P'_2$ , Вт	(1.275)	1950	3840	5720	7610	9500
$R_n$ , Ом	(1.270)	72	35,3	22,6	16,17	12,1
$z_n$ , Ом	(1.276)	73,2	36,6	23,9	17,56	13,6
$s$ , о. е.	(1.278)	0,006	0,012	0,019	0,026	0,035
$I''_2$ , А	(1.280)	3	6	9,2	12,5	16,2
$I_{a1}$ , А	(1.281)	3,75	6,5	9,6	12,8	16,3
$I_{p1}$ , А	(1.282)	5,6	5,9	6,5	7,61	9,1
$I_1$ , А	(1.283)	6,7	8,7	11,5	14,3	18,7



Продолжение таблицы 1.47

$\cos\varphi$	(1.284)	0,55	0,74	0,83	0,86	0,87
$P_{м1}$ , Вт	(1.294)	85	147	257	426	675
$P_{м2}$ , Вт	(1.295)	12	46	120	202	347
$P_{\Sigma}$ , Вт	(1.296)	420	525	720	981	1387
$P_1$ , Вт	(1.297)	2295	4275	6345	8480	10760
$\eta$ , %	(1.298)	81,7	87,7	88,7	88,4	87,1
<b>Результаты расчета рабочих характеристик двигателя №2</b>						
$P_2$ , кВт	задание	40	80	120	160	200
$P_d$ , Вт	(1.274)	215	430	645	860	1075
$P'_2$ , Вт	(1.275)	40700	80920	121100	161350	201600
$R_n$ , Ом	(1.270a)	10,36	5,02	3,2	2,24	1,64
$z_n$ , Ом	(1.276)	10,5	5,18	3,4	2,45	1,88
$s$ , о. е.	(1.278)	0,007	0,014	0,024	0,03	0,047
$I'_2$ , А	(1.280)	36,2	73,4	111,8	155	202
$I_{a1}$ , А	(1.281)	37,5	74,3	109,5	151	191,5
$I_{p1}$ , А	(1.282)	40,9	47,5	59,2	80,2	106,7
$I_1$ , А	(1.283)	55,5	88,2	124,5	171	219
$\cos\varphi$	(1.284)	0,68	0,84	0,87	0,88	0,86
$P_{м1}$ , Вт	(1.294)	490	1240	2460	4649	7630
$P_{м2}$ , Вт	(1.295)	275	1130	2625	5045	8570
$P_{\Sigma}$ , Вт	(1.296)	2780	4600	7530	12580	19070
$P_1$ , Вт	(1.297)	42780	84600	127500	172600	219100
$\eta$ , %	(1.298)	93,5	94,5	94	92,7	91,3

Рабочие характеристики могут быть рассчитаны и построены также с помощью круговой диаграммы. Покажем определение искомых параметров  $I_1$ ;  $\eta$ ;  $\cos\varphi$  и  $s$  по круговой диаграмме для одной точки рабочей характеристики, соответствующей номинальному значению  $P_2$  и  $P'_2$  (точка  $A$  на рисунке 1.21). Ток статора  $I_1$  определяется отрезком  $O_1A$ , ток ротора  $I'_2$  – отрезком  $OA$ , в масштабе тока  $c_I$ . Для определения  $\cos\varphi$  необходимо продлить вектор тока  $I_1$  (отрезок  $O_1A$ ) до пересечения с вспомогательной окружностью  $\cos\varphi$  в точке  $L$ , провести из точки  $L$  линию параллельно оси абсцисс до пересечения оси ординат в точке  $N$ . Значение отрезка  $O_1N$  (мм), деленное на 100, соответствует искомому  $\cos\varphi$ . Подводящая мощность  $P_1$  равна длине перпендикуляра  $AT$  к оси абсцисс (в масштабе мощности  $c_P$ ). По полученным из круговой диаграммы значениям  $I_1$ ;  $I'_2$  и  $P_1$  определяют  $P_{м1}$ ,  $P_{м2}$ ,  $P_{\Sigma}$  и  $\eta$  по формулам (1.294) – (1.298). Скольжение:

$$s = P_{M2} / (P'_2 + P_{M2}). \quad (1.304)$$

Аналогичные расчеты выполняют для других значений мощностей, равных  $0,25P_2$ ;  $0,5P_2$ ;  $0,75P_2$ ;  $1,25P_2$ , определяя вначале на круговой диаграмме точки, соответствующие этим значениям мощностей (аналогично нахождению точки  $A$ ).

Для аналитического расчета рабочих характеристик можно воспользоваться формулами, применяемыми для определения номинальных значений  $I_1$ ;  $\eta$ ;  $\cos\varphi$  и  $s$  при номинальном значении  $P_2$ . По этим формулам можно рассчитать интересующие нас параметры для пяти значений  $P_2$  ( $0,25P_2$ ;  $0,5P_2$ ;  $0,75P_2$ ;  $P_2$ ;  $1,25P_2$ ) и построить рабочие характеристики (в формулы вместо  $P_2$  необходимо подставить соответствующие долевые значения  $P_2$ ). При расчете  $P_d$  по (1.274) условно принимают значение КПД для долевых значений  $P_2$  равным  $\eta'$  при номинальном значении  $P_2$ . Результаты расчетов целесообразно свести по форме как в таблице 1.47.

В таблице 1.48 приведен пример расчета круговой диаграммы и рабочих характеристик.

**Таблица 1.48 – Пример круговой диаграммы и рабочих характеристик**

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1	Двигатель №2
325	$c_1$ , А / мм	(1.301) §1.10	$220 / (200 \div 300) 3,35 =$ $= 0,328 \div 0,218$ принимая $c_1 = 0,3$	$380 / (200 \div 30) 0,664 =$ $= 2,86 \div 1,91$ принимая $c_1 = 2,0$
326	$D_a$ , мм	(1.301)	$220 / (0,3 \cdot 3,35) = 219$	$380 / (2 \cdot 0,664) = 286$
327	$c_p$ , кВт / мм	(1.302)	$3 \cdot 220 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 0,2$	$3 \cdot 380 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 2,3$
328	$I_{c.p.}$ , мм	§1.10	$5,56 / 0,3 = 18,7$	$39,7 / 2 = 19,5$
329	$I_{c.a.}$ , мм	§1.10	$0,46 / 0,3 = 1,5$	$1,57 / 2 = 0,68$
330	$BC$ , мм	(1.303)	$2 \cdot 0,016 \cdot 100 = 3,2$	$2 \cdot 0,0055 \cdot 100 = 1;$ $BC \approx 0$
331	$BE$ , мм	(1.303)	$0,64 \cdot 100 / 3,35 = 19,1$	$0,053 \cdot 100 / 0,664 = 8,0$
332	$BF$ , мм	(1.303)	$1,07 \cdot 100 / 3,35 = 32$	$0,123 \cdot 100 / 0,664 = 18,5$

Примеры построения рабочих характеристик, рассчитанных аналитически, приведены на рисунке 1.22. При построении характеристик необходимо иметь в виду, что при  $P_2 = 0$ ;  $I_1 = I_0$ ;  $\cos\varphi = \cos\varphi_0$ ;  $\eta = 0$ ;  $s = s_0$  (индекс «0» соответствует х. х.).

Круговые диаграммы для двигателей №1 и №2 построены на рисунке 1.21 а и б. Расчет рабочих характеристик аналитическим методом сведен в таблице 1.47.

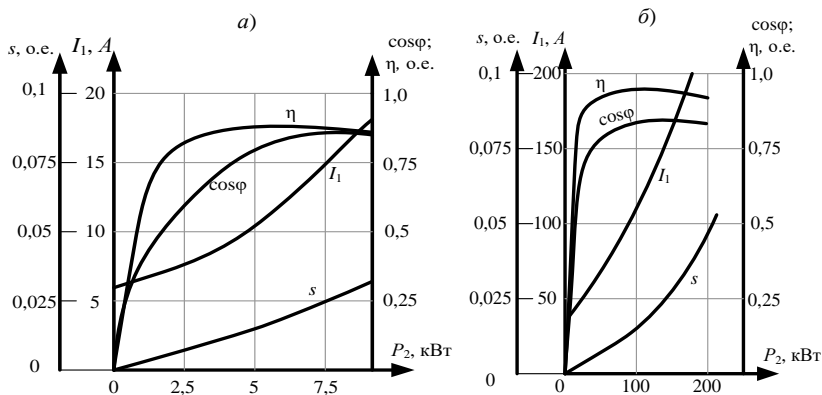


Рисунок 1.22 – Рабочие характеристики двигателей: а – №1; б – №2

По данным таблицы построены рабочие характеристики двигателя №1 на рисунке 1.22, а, №2 – 1.22, б.

### 1.11 Максимальный момент

Максимальный момент асинхронного двигателя должен быть не менее предписанного ГОСТ 19523 или 9362 – 68. При нагрузках, соответствующих моментам, близким к максимальному, токи статора и ротора обычно в два с половиной – три раза больше, чем при номинальной нагрузке. При таких токах наступает насыщение путей потоков рассеяния, вызывающее уменьшение индуктивных сопротивлений статора и ротора и учитываемое при определении максимального момента. Вытеснением тока в обмотке ротора при определении максимального момента можно пренебречь, так как при критическом скольжении частота в роторе невелика.

Для расчета максимального момента можно воспользоваться схемой замещения, приведенной на рисунке 1.20, но при этом сопротивление  $R_n$  заменить на сопротивление  $R_m$ , а индуктивные сопротивления определить с учетом насыщения соответствующего нагрузкам при максимальном моменте.

Для учета насыщения путей потоков рассеяния все рассчитанные магнитные проводимости статора и ротора ( $\lambda_n$ ,  $\lambda_d$ ,  $\lambda_l$ ) подразделяют на две части. К *первой* относятся все проводимости, зависящие от насыщения, т. е. переменные – часть проводимости пазового рассеяния (рассеяния клиновой части и шлица пазов статора и ротора, мостиков закрытых пазов ротора), проводимости дифференциального рассеяния статора и ротора. Ко *второй* части – все проводимости, не зависящие от

насыщения, т. е. постоянные – оставшаяся часть проводимости пазового рассеяния, проводимости рассеяния лобовых частей обмоток статора и фазного ротора, проводимости рассеяния короткозамыкающих колец и проводимость рассеяния скоса пазов.

Расчет максимального момента проводят в последовательности, указанной в таблице 1.49.

**Таблица 1.49 – Формулы расчета максимального момента**

Переменная часть коэффициента статора $\lambda_{\text{н1}}$ , при: трапецидальном полузакрытом пазе	$\lambda_{\text{н1пер}} = (3h_{\text{к1}} / (b_2 + b_{\text{ш1}}) + h_{\text{ш1}} / b_{\text{ш1}}) k'_{\beta}$	(1.305)
прямоугольным полуоткрытым пазе	$\lambda_{\text{н1пер}} = (3h_{\text{к1}} / (b_{\text{н1}} + 2b_{\text{ш1}}) + h_{\text{ш1}} / b_{\text{ш1}}) k'$	(1.306)
прямоугольным открытым пазе	$\lambda_{\text{н1пер}} = (h_{\text{к1}} + h_{\text{ш1}}) k'_{\beta} / b_{\text{н1}}$	(1.307)
Составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения	$\lambda_{\text{1пер}} = \lambda_{\text{н1пер}} + \lambda_{\text{Д1}}$	(1.308)
Переменная часть коэффициента ротора $\lambda_{\text{н2}}$ , при: овальном полузакрытом пазе	$\lambda_{\text{н2пер}} = h_{\text{ш2}} / b_{\text{ш2}}$	(1.309)
овальном закрытом пазе	$\lambda_{\text{н2пер}} = 1,12h_2 \cdot 10^3 / I_2$	(1.310)
бутылочном закрытом пазе	$\lambda_{\text{н2пер}} = \lambda_{\text{Н.В.пер}} = 1,12h_2 \cdot 10^3 / I_2$	(1.311)
прямоугольным открытым пазе	$\lambda_{\text{н2пер}} = h_{\text{ш2}} / b_{\text{н2}}$	(1.312)
прямоугольным полузакрытым пазе	$\lambda_{\text{н2пер}} = (3h_{\text{к2}} / (b_{\text{н2}} + 2b_{\text{ш2}}) + h_{\text{ш2}} / b_{\text{ш2}}) k'_{\beta}$	(1.313)
Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения	$\lambda_{\text{2ппе}} = \lambda_{\text{н2пер}} + \lambda_{\text{Д2}}$	(1.314)
Индуктивное сопротивление рассеяния (при любой форме пазов статора и	$x_{\text{пер}} = x'_1 \lambda_{\text{1ппе}} / \lambda_1 + x''_2 \lambda_{\text{2ппе}} / \lambda_2$	(1.315)

ротора, кроме бутылочной), зависящее от насыщения (Ом):		
---	--	--

Продолжение таблицы 1.49

не зависящее от насыщения	$x_{\text{пост}} = x'_1(\lambda_1 - \lambda_{1\text{ппе}})/\lambda_1 + x''_2(\lambda_2 - \lambda_{2\text{ппе}})/\lambda_2$	(1.316)
Для бутылочного закрытого паза ротора: преобразованное индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору (Ом)	$x''_0 = x'_0(1 + \tau_1)^2$	(1.317)
преобразованное индуктивное сопротивление нижней части клетки ротора (Ом)	$x''_{\text{н}} = x'_{\text{н}}(1 + \tau_1)^2$	(1.318)
индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения (Ом)	$x_{\text{пер}} = x'_1\lambda_{1\text{пер}}/\lambda_1 + x''_0\lambda_{2\text{пер}}/\lambda_{20}$	(1.319)
индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения (Ом)	$x_{\text{пост}} = x'_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1\text{пер}}}{\lambda_1} + x''_0 \frac{\lambda_{20} - \lambda_{2\text{пер}}}{\lambda_{20}} +$ $+ x''_{\text{н}} \left( \frac{s_{\text{ст.н}}}{s_{\text{ст.в}} + s_{\text{ст.н}}} \right)^2$	(1.320)
Ток ротора, соответствующий максимальному моменту, при любой форме пазов статора, при открытых или полузакрытых пазах ротора (А)	$I_{\text{м2}}^* = \frac{U_1}{\sqrt{2 \left[ \left( r_1^2 + \left( x_{\text{пост}} + 0,0825x_{\text{пер}} \right)^2 + r_1' \left( x_{\text{пост}} + 0,0825x_{\text{пер}} \right) \right) \right]}}$ $1,24 \cdot 10^3 \delta_{\text{а1}} \left[ r_1' + 2 \left( x_{\text{пост}} + 0,0825x_{\text{пер}} \right) \right] x_{\text{пер}}$ $2N_{\text{п1}} \left[ r_1^2 + \left( x_{\text{пост}} + 0,0825x_{\text{пер}} \right)^2 + r_1' \left( x_{\text{пост}} + 0,0825x_{\text{пер}} \right) \right]$	(1.321)

То же, при закрытых овалных или бутылочных пазах ротора	$I_{M2}' = \frac{U_1}{\sqrt{2[r_1'^2 + (x_{\text{пост}} + 0,25x_{\text{пер}})^2 + r_1' (x_{\text{пост}} + 0,25x_{\text{пер}})]}} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \delta a_1 [r_1' + 2(x_{\text{пост}} + 0,25x_{\text{пер}})] x_{\text{пер}}}{2N_{\text{пл}} [r_1'^2 + (x_{\text{пост}} + 0,25x_{\text{пер}})^2 + r_1' (x_{\text{пост}} + 0,25x_{\text{пер}})]}$	(1.322)
Полное сопротивление схемы замещения (Ом): при максимальном моменте	$z_M = U_1 / I_{M2}''$	(1.323)

Продолжение таблицы 1.49

при бесконечно большом скольжении ( $s > \infty$ )	$z_{\infty} = \sqrt{z_1'^2 + x_H^2}$	(1.324)
Эквивалентное сопротивление схемы замещения при максимальном моменте (Ом)	$R_M = z_{\infty} + r_1'$	(1.325)
Кратность максимального момента	$\frac{M_{\text{max}}}{M_H} = \frac{m_1 U_1^2 (1 - s_H')}{2R_M P_2 \cdot 10^3}$	(1.326)
Скольжение при максимальном моменте (о. е.)	$s_M = r_1' / z_{\infty}$	(1.327)

В таблице 1.50 приведен пример расчета максимального момента.

Таблица 1.50 – Пример расчета максимального момента

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1	Двигатель №2
333	$\lambda_{1\text{пер}}$	(1.305)	$\left( \frac{3 \cdot 0,7}{7,07 + 2 \cdot 3,5} + \frac{0,5}{3,5} \right) \cdot 1 = 0,29$	—
334	$\lambda_{1\text{пер}}$	(1.306)	—	$\left( \frac{3,3}{9,5 + 2 \cdot 5,5} + \frac{1}{5,5} \right) 0,8 = 0,5$
335	$\lambda_{1\text{пер}}$	(1.308)	$0,29 + 3,85 = 4,14$	$0,5 + 1,31 = 1,81$
336	$\lambda_{2\text{пер}}$	(1.309)	$0,75 / 1,5 = 0,5$	—
337	$\lambda_{2\text{пер}}$	(1.313)	—	$\left( \frac{3 \cdot 3,0}{5,18 + 2 \cdot 1,5} + \frac{1}{1,5} \right) 0,97 = 1,71$



338	$\lambda_{2\text{пер}}$	(1.314)	$0,5 + 2,73 = 3,23$	$1,71 + 0,9 = 2,61$
339	$x_{\text{пер, ОМ}}$	(1.315)	$1,55 \frac{4,14}{6,18} + 1,8 \frac{3,23}{7,1} = 1,86$	$\frac{2,61}{6,48} = 0,277$
340	$x_{\text{пост, ОМ}}$	(1.316)	$1,55 \frac{6,18 - 4,14}{6,18} +$ $+ 1,8 \frac{7,1 - 3,23}{7,1} = 1,49$	$0,294 \frac{4,16 - 1,81}{4,16} +$ $+ 0,37 \frac{6,48 - 2,61}{6,48} = 0,387$

Продолжение таблицы 1.49

			220	380
			$\sqrt{2 \left[ \frac{0,64^2 + (1,49 + 0,0825 \cdot 1,86)^2}{+ 0,64(1,49 + 0,0825 \cdot 1,86)} \right]}$ $\left( \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot 0,35 \cdot 1[0,64 + 2 \cdot (1,49 + 0,0825 \cdot 1,86)] \cdot 1,86}{2 \cdot 2[0,64^2 + (1,49 + 0,0825 \cdot 1,86)^2 + 0,64(1,49 + 0,0825 \cdot 1,86)]} \right) =$ $= 58,24$	$\sqrt{2 \left[ \frac{0,053^2 + (0,387 + 0,0825 \cdot 0,277)^2}{+ 0,053(0,387 + 0,0825 \cdot 0,277)} \right]}$ $\left( \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot 0,9 \cdot 3 \cdot 10,053 + 2 \cdot (0,387 + 0,0825 \cdot 0,277) \cdot 0,277}{2 \cdot 17(0,053^2 + (0,387 + 0,0825 \cdot 0,277)^2 + 0,053 \cdot (0,387 + 0,0825 \cdot 0,277))} \right) =$ $= 489$
341	$I''_{м2}, A$	(1.321)		
342	$z_{м}, Ом$	(1.323)	$220 / 58,24 = 3,78$	$380 / 489 = 0,78$
343	$z_{\infty}, Ом$	(1.324)	$\frac{\sqrt{0,64^2 + 2 \cdot 3,78^2}}{2}$ $- \frac{0,64^2}{2} = 2,5$	$\frac{\sqrt{0,053^2 + 2 \cdot 0,78^2}}{2}$ $- \frac{0,53^2}{2} = 0,55$
344	$R_{м}, Ом$	(1.325)	$2,5 + 0,64 = 3,14$	$0,53 + 0,055 = 0,585$
345	$M_{max}/M_{н}, о. е.$	(1.326)	$\frac{3 \cdot 220^2(1 - 0,026)}{2 \cdot 3,14 \cdot 7,5 \cdot 10^3} = 3$	$\frac{3 \cdot 380^2(1 - 0,03)}{2 \cdot 0,585 \cdot 160 \cdot 10^3} = 2,2$
346	$s_{м}, о. е.$	(1.327)	$0,44 / 2,5 = 0,18$	$0,07 / 0,53 = 0,13$

## 1.12 Начальный пусковой ток и начальный пусковой момент

Пусковые свойства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором характеризуются значениями начальных пускового тока и момента (ГОСТ 19523 или 9362). При определении пусковых тока и момента необходимо учитывать два явления, происходящие в двигателях с короткозамкнутым ротором, при пуске – вытеснение тока в пазах короткозамкнутой обмотки ротора и насыщение путей потоков рассеяния в зубцах статора и ротора. Вследствие вытеснения тока увеличивается  $r''_2$ , и уменьшается  $x''_2$ , а в результате насыщения уменьшаются  $x'_1$  и  $x''_2$ , поэтому расчет пускового режима следует начинать с определения активных и индуктивных сопротивлений, соответствующих этому режиму. Последовательность расчета такая: определяют  $r''_2$  и  $x''_2$  с учетом вытеснения тока, затем учитывают влияния насыщения на уменьшение  $x'_1$  и  $x''_2$ , разделяя индуктивное сопротивление к. з. при пуске на постоянную и переменную части.

Степень вытеснения тока в стержнях клетки ротора характеризуется приведенной высотой стержня:

$$\xi = 0,002 h_{ст} \sqrt{b_{ст} / b_{п2}} \sqrt{27 / m_T} \sqrt{s f_1}, \quad (1.328)$$

где  $s$  – скольжение.

Для литой алюминиевой клетки  $b_{ст} = b_{п2}$ , тогда при  $f = 50$  Гц:

$$\xi = 0,0735 h_{ст} \sqrt{s / m_T}. \quad (1.329)$$

Высота стержня (мм): при полузакрытых пазах:

$$h_{\text{ст}} = h_{\text{н2}} - h_{\text{ш2}}; \quad (1.330)$$

при закрытых пазах:

$$h_{\text{ст}} = h_{\text{н2}} - h_2 - h_{\text{ш2}}. \quad (1.331)$$

Активные и индуктивные сопротивления, соответствующие пусковому режиму, определяют в указанной ниже последовательности.

Овальный полузакрытый или закрытый паз ротора рассчитывается по формулам, приведенным в таблице 1.51.

**Таблица 1.51 – Формулы для расчета овального полузакрытого или закрытого паза ротора**

Высота стержня клетки ротора (мм)	$h_{\text{ст}}$ – по (1.330) или (1.331)	–
Приведенная высота стержня ротора	$\xi$ – по (1.329)	–
Коэффициент $\varphi$	$\varphi = f(\xi)$ – по рисунку 1.23	
Расчетная глубина проникновения тока в стержень (мм)	$h_p = h_{\text{ст}} / (1 + \varphi)$	(1.332)
Ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока (мм): при $r_1 \leq h_p \leq r_1 + h_1$	$b_p = 2r_1 - \frac{2(r_1 - r_2)}{h_1}(h_p - r_1)$	(1.333)
при $h_p < r_1$	$b_p = 2\sqrt{r_1^2 - (r_1 - h_p)^2}$	(1.334)
Площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока (мм <sup>2</sup> ) при $r_1 \leq h_p \leq r_1 + h_1$	$s_p = \frac{\pi}{2}r_1^2 + \left(r_1 + \frac{b_p}{2}\right)(h_p - r_1)$	(1.335)
при $h_p < r_1$	$s_p = \left[r_1\left(\sqrt{b_p^2 + 5,33h_p^2} - b_p\right) + b_ph_p\right] / 2$	(1.336)
Коэффициент вытеснения тока	$k_{\text{В.Т}} = s_{\text{ст}} / s_p$	(1.337)
Активное сопротивление стержня клетки при 20 <sup>0</sup> С для пускового режима (Ом)	$r_{\text{ст.п}} = r_{\text{ст}}k_{\text{В.Т}}$	(1.338)
Активное сопротивление обмотки ротора при 20 <sup>0</sup> С, приведенное к обмотке статора (для пускового режима) (Ом)	$r'_{2\text{п}} = k_{\text{пр1}}(r_{\text{ст.п}} + r_{\text{кл}})$	(1.339)

Продолжение таблицы 1.51

Коэффициент $\psi$	$\psi = f(\xi)$ – по рисунку 1.23	
Коэффициент проводимости рассеяния паза ротора (при пуске): для овального полузакрытого паза	$\lambda_{н2п} = \frac{h_{м2}}{b_{м2}} + \left[ \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \left( 1 - \frac{\pi r_1^2}{2s_{сг}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{м2}}{4r_1} \right] \psi$	(1.340)
для овального закрытого паза	$\lambda_{н2п} = \left[ \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \left( 1 - \frac{\pi r_1^2}{2s_{сг}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{м2}}{4r_1} \right] \psi + 1,12 \frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2} + 0,3$	(1.341)
Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора при пуске	$\lambda_{2п} = \lambda_{н2п} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск}$	(1.342)
Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее и не зависящее от насыщения (Ом)	$x_{пер} = x'_1 \frac{\lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_2 \frac{\lambda_{2пер}}{\lambda_{2п}}$	(1.343)
	$x_{пост} = x'_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1пне}}{\lambda_1} + x''_2 \frac{\lambda_{2п} - \lambda_{2пне}}{\lambda_{2п}}$	(1.344)
Активное сопротивление короткого замыкания при пуске (Ом)	$r_{к.п} = r'_1 + r'_{2п} m_T (1 + \tau_1)^2 (1 + \rho_1)^2$	(1.345)

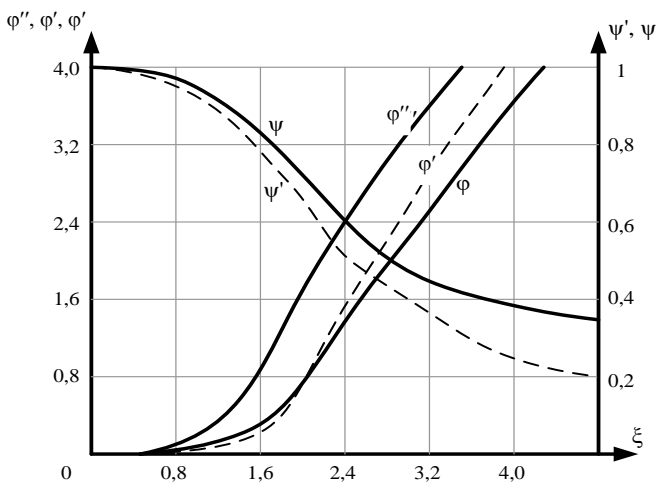


Рисунок 1.23 – Зависимость  $\phi$  и  $\psi=f(\xi)$

**Прямоугольный открытый паз ротора и сварная алюминиевая клетка.** Сопротивления обмоток определяют как для ротора с овальными пазами со следующими изменениями.

Коэффициент вытеснения тока:

$$k_{в.т} = 1 + \varphi(l_2 - n_k l_k) / l_2. \quad (1.346)$$

Коэффициент проводимости рассеяния прямоугольного открытого паза ротора:

$$\lambda_{п2п} = \psi(h_{п2} - h_{ш2}) / (3b_{п2}) + h_{ш2} / b_{п2}. \quad (1.347)$$

Для определения коэффициента  $\xi$  в (1.328) следует подставить  $b_{ст} / b_{п2} = 0,9$  и  $\gamma_{ал} = 30$  См / мкм (вместо  $\gamma_{ал} = 27$  См / мкм), при этом числовой коэффициент получается равным 0,735, что позволяет пользоваться формулой (1.329).

Бутылочный закрытый паз ротора рассчитывается по формулам, приведенным в таблице 1.52.

**Таблица 1.52 – Формулы для расчета бутылочного закрытого паза ротора**

Высота стержня (мм)	$h_{см} = h_{п2} - h_2$	(1.348)
Приведенная высота стержня ротора	$\xi$ – по (1.329)	–
Коэффициенты	$\varphi$ и $\psi$ – по рисунку 1.23	–
Расчетная глубина проникновения тока в нижнюю часть стержня (мм)	$h_{р.н} = [h_{ст} / (1 + \varphi)] - h$	(1.349)
Ширина нижней части стержня на расчетной глубине проникновения тока (мм) при $r_1 \leq h_{р.н} \leq r_1 + h_1$	$b_{р.н} = 2r_1 - \frac{2(r_1 - r_2)}{h_1}(h_{р.н} - r_1)$	(1.350)
при $h_{р.н} < r_1$	$b_{р.н} = 2\sqrt{r_1^2 - (r_1 - h_{р.н})^2}$	(1.351)
Площадь поперечного сечения нижней части стержня при расчетной глубине проникновения тока (мм <sup>2</sup> ) при $r_1 \leq h_{р.н} \leq r_1 + h_1$	$s_{р.н2} = \frac{\pi}{2} r_1^2 + \left(r_1 + \frac{b_{р.н}}{2}\right)(h_{р.н} - r_1)$	(1.352)

Продолжение таблицы 1.52

при $h_{p.n} < r_1$	$s_{p.n} = \frac{r_1 \left( \sqrt{b_{p.n}^2 + 5,33h_{p.n}^2} - b_{p.n} \right) + b_{p.n} h_{p.n}}{2}$	(1.353)
Коэффициент вытеснения тока в нижней части стержня	$k_{B.T.H} = s_{ст.н} / s_{p.n}$	(1.354)
Активное сопротивление нижней части стержня, приведенное к статору (Ом)	$r'_{ст.н.п} = r'_{ст.н} k_{B.T.H}$	(1.355)
Активное результирующее сопротивление при 20°C (Ом)	$r'_{2п} = r'_0 + r'_{ст.в} r'_{ст.н.п} / (r'_{ст.в} + r'_{ст.н.п})$	(1.356)
Коэффициент	$\psi'' = [(h_{n2} - h_2)\psi - h] / (h_{n2} - h_2 - h)$	(1.357)
Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda_{2н.п} = \left[ \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \left( 1 - \frac{\pi r_1^2}{2s_{ст.н}} \right)^2 + \right] \psi'' + 0,66 - b / (4r_1) + (h + 0,18) / (2b)$	(1.358)
Приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки	$\lambda'_{2нн.} = \lambda_{2н.п} l_2 z_1 k^2_{об} / (l_1 z_2)$	(1.359)
Индуктивное сопротивление нижней части клетки, приведенное к статору (Ом)	$x'_{н.п} = x_1 \lambda'_{2н.п} / \lambda_1$	(1.360)
Расчетная глубина проникновения тока в нижний стержень (для расчета $x$ ) (мм)	$h_{xn} = (h_{n2} - h_2)\psi - h$	(1.361)
Ширина нижнего стержня на расчетной глубине проникновения тока (для расчета $x$ ) (мм) при $r_1 \leq h_{xn} \leq r_1 + h_1$	$b_{xn} = 2r_1 - \frac{2(r_1 - r_2)}{h_1} (h_{xn} - r_1)$	(1.362)

Продолжение таблицы 1.52

при $h_{\text{хн}} < r_1$	$b_{\text{хн}} = 2\sqrt{r_1^2 - (r_1 - h_{\text{хн}})^2}$	(1.363)
Площадь поперечного сечения нижнего стержня при расчетной глубине проникновения тока (мм <sup>2</sup> ) при $r_1 \leq h_{\text{хн}} \leq r_1 + h_1$	$s_{\text{хн}} = \frac{\pi}{2} r_1^2 + \left(r_1 + \frac{b_{\text{хн}}}{2}\right)(h_{\text{хн}} - r_1)$	(1.364)
при $h_{\text{хн}} < r_1$	$s_{\text{хн}} = r_1 \left(\sqrt{b_{\text{хн}}^2 + 5,33h_{\text{хн}}^2} - b_{\text{хн}} h_{\text{хн}}\right) / 2$	(1.365)
Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения	$\lambda_{2\text{пер}} - \text{по (1.314)}$	—
Преобразованное индуктивное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору (Ом)	$x''_0 - \text{по (1.317)}$	
Преобразованное индуктивное сопротивление нижней части клетки ротора (Ом)	$x''_{\text{н.п}} = x'_{\text{н.п}} (1 + \tau_1)^2$	(1.366)
Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения (Ом)	$x_{\text{пер}} - \text{по (1.319)}$	
Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения (Ом)	$x_{\text{пост}} = x'_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1\text{пер}}}{\lambda_1} + x''_0 \frac{\lambda_{20} - \lambda_{2\text{пер}}}{\lambda_{20}} + x''_{\text{н.п}} \left(\frac{s_{\text{хн}}}{s_{\text{хн}} + s_{\text{ст.в}}}\right)^2$	(1.367)
Активное сопротивление к. з. при пуске (Ом)	$r_{\text{к. п}} - \text{по (1.345)}$	—
<b>Пусковой ток и момент</b>		
Ток ротора при пуске для двигателей с открытыми и полузакрытыми пазами короткозамкнутого ротора и с любой формой пазов статора (А)	$I''_{\text{п2}} = \frac{U_1}{\sqrt{r_{\text{к.п}}^2 + (x_{\text{пост}} + 0,0825x_{\text{пер}})^2}} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \delta a_1 x_{\text{пер}} (x_{\text{пост}} + 0,0825x_{\text{пер}})}{N_{\text{п1}} [r_{\text{к.п}}^2 + (x_{\text{пост}} + 0,0825x_{\text{пер}})^2]}$	(1.368)

Продолжение таблицы 1.52

То же, для двигателей с закрытыми пазами ротора	$I''_{n2} = \frac{U_1}{\sqrt{r_{кп}^2 + (x_{пост} + 0,25x_{пер})^2}} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \delta a_1 x_{пер} (x_{пост} + 0,25x_{пер})}{N_{п1} [r_{кп}^2 + (x_{пост} + 0,25x_{пер})^2]}$	(1.369)
Полное сопротивление схемы замещения при пуске (с учетом явлений вытеснения тока и насыщения путей потоков рассеяния) (Ом)	$z_{кп} = U_1 / I''_{n2}$	(1.370)
Индуктивное сопротивление схемы замещения при пуске (Ом)	$x_{кп} = \sqrt{z_{кп}^2 - r_{кп}^2}$	(1.371)
Активная и реактивная составляющие тока статора при пуске (А)	$I_{п.а1} = I_{с.а} + I''_{n2} \left( \frac{r_{кп}}{z_{кп}} \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_{кп}}{z_{кп}} \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right)$ $I_{п.р1} = I_{с.р} + I''_{n2} \left( \frac{r_{кп}}{z_{кп}} \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{x_{кп}}{z_{кп}} \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right)$	(1.372) (1.373)
Фазный ток статора при пуске (А)	$I_{n1} = \sqrt{I_{п.а1}^2 + I_{п.р1}^2}$	(1.374)
Кратность начального пускового тока	$I_{п1} / I_1$	(1.375)
Активное сопротивление ротора при пуске, приведенное к статору, при расчетной рабочей температуре и Г-образной схеме замещения (Ом)	$r''_{2п} = r'_{2п} m_T (1 + \tau_1)^2 (1 + \rho_1^2)$	(1.376)
Кратность начального пускового момента	$\frac{M_{п}}{M_{н}} = m_1 I_{n2}''^2 r_{2п}'' (1 - s_n) / (P_2 \cdot 10)^3$	(1.377)

В таблице 1.53 приведен пример расчета пускового тока и пускового момента.

Таблица 1.53 – Пример расчета пускового тока и пускового момента

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1
347	$h_{ст}, \text{ мм}$	(1.330)	$25,5 - 0,75 = 24,75$



348	$\xi$	(1.329)	$0,0735 \cdot 24,75 \sqrt{1/1,22} = 1,65$
<i>Продолжение таблицы 1.53</i>			
349	$\varphi$	рисунок 1.23	0,4
350	$h_p$ , мм	(1.332)	$24,75 / (1 + 0,4) = 17,7$
351	$b_p$ , мм	(1.333)	$2 \cdot 2,9 - \frac{2(2,9-1)}{20,8} (17,7 - 2,9) = 3,1$
352	$s_p$ , мм <sup>2</sup>	(1.335)	$\frac{\pi}{2} 2,9^2 + (2,9 + 3,1/2)(17,7 - 2,9) = 79,06$
353	$k_{в.т}$	(1.337)	$95,9 / 79,06 = 1,21$
354	$r_{ст.п}$ , Ом	(1.338)	$4,44 \cdot 10^{-5} \cdot 1,21 = 5,33 \cdot 10^{-5}$
355	$r'_{2п}$ , Ом	(1.339)	$5206 (5,33 + 1,85) \cdot 10^{-5} = 0,374$
356	$\psi$	рисунок 1.23	0,82
357	$\lambda_{п2п}$	(1.340)	$\frac{0,75}{1,5} + \left[ \frac{20,8 + 0,8 \cdot 1}{6 \cdot 2,9} \left( 1 - \frac{2,9^2}{2 \cdot 95,9} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{4 \cdot 2,9} \right] 0,82 = 1,69$
358	$\lambda_{2п}$	(1.342)	$1,69 + 2,73 + 0,436 + 2,1 = 6,87$
359	$x_{пер}$ , Ом	(1.343)	$1,55 \frac{4,14}{6,18} + 1,8 \frac{3,23}{6,87} = 1,88$
360	$x_{пост}$ , Ом	(1.344)	$1,55 \frac{6,18 - 4,14}{6,18} + 1,8 \frac{6,87 - 3,23}{6,87} = 1,47$
361	$r_{к.п}$ , Ом	(1.345)	$0,64 + 0,374 \cdot 1,22 (1 + 0,04)^2 = 1,14$
362	$I''_{n2}$ , А	(1.368)	$\frac{220 / \sqrt{1,14^2 + (1,47 + 0,0825 \cdot 1,88)^2} - 1,24 \cdot 10^3 \cdot 0,35 \cdot 1 \cdot 1,88 (1,47 + 0,0825 \cdot 1,88)}{21 [1,14^2 + (1,47 + 0,0825 \cdot 1,88)^2]} = 95,2$
363	$z_{к.п}$ , Ом	(1.370)	$220 / 95,2 = 2,3$
364	$x_{к.п}$ , Ом	(1.371)	$\sqrt{2,3^2 - 1,14^2} = 2,0$
365	$I_{п.а1}$ , А	(1.372)	$0,46 + 95,2 \left( \frac{1,14}{2,3} + \frac{2,0}{2,3} 2 \cdot 0,016 \right) = 50,3$
366	$I_{п.п1}$ , А	(1.373)	$5,57 + 95,2 \left( \frac{2}{2,3} - \frac{1,14}{2,3} 2 \cdot 0,016 \right) = 86,9$
367	$I_{п1}$ , А	(1.374)	$\sqrt{50,3^2 + 86,9^2} = 100,4$
368	$I_{п1} / I_1$ , о. е.	(1.375)	$100,4 / 14,9 = 6,7$
369	$r''_{2п}$ , Ом	(1.376)	$0,374 \cdot 1,22 \cdot 1,04^2 = 0,49$

370	$M_n / M_n$	(1.377)	$\frac{3 \cdot 95,2^2 \cdot 0,49(1-0,026)}{7,5 \cdot 10^3} = 1,7$
-----	-------------	---------	---

### 1.13 Тепловой и вентиляционный расчеты

**Тепловой расчет асинхронного двигателя.** Проводим его по упрощенной методике, изложенной в [1].

При выполнении теплового расчета необходимо учитывать следующее:

1. Потери в обмотках вычисляют при сопротивлениях, приведенных к максимальной допускаемой температуре; для этого сопротивление, определенное при 20°C, умножают на коэффициент  $m'_T$  в соответствии с выбранным классом нагревостойкости изоляции.

2. При тепловом расчете обмотки статора учитывают, что воздуху внутри АД передается только часть потерь в активной части статора (эта доля потерь равна коэффициенту  $k$  из таблицы 1.54); остальные потери передаются непосредственно через станину наружному воздуху.

Таблица 1.54 – Коэффициент  $k$

Количество полюсов $2p$	Коэффициент $k$ для двигателей со степенью защиты	
	IP44	IP23
2; 4	0,20 – 0,22	0,80 – 0,84
6; 8	0,18 – 0,19	0,76 – 0,78
10; 12	0,16 – 0,17	0,72 – 0,74

3. Для обмоток, не имеющих изоляцию катушек в лобовых частях, первое слагаемое в (1.394), а также  $\Delta t_{н.л1}$  в (1.395) необходимо считать равными нулю.

4. При определении по (1.400) среднего превышения температуры воздуха внутри машины  $\Delta t_v$  у асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 принимают, что воздух внутри двигателя нагревается всеми выделяемыми потерями (за исключением части потерь в статоре, передаваемых через станину), а у двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141, кроме того, за исключением потерь на трение о воздух наружного вентилятора, составляющие примерно  $0,9P_{мх\Sigma}$ .

**Обмотка статора.** Тепловой расчет для определения превышения температуры обмотки статора проводят в последовательности, указанной в таблице 1.55.

Таблица 1.55 – Формулы для определения превышения температуры обмотки статора

Потери в обмотке статора при максимальной допускаемой	$P'_{M1} = m_1 I_1^2 m'_T r'_1$	(1.378)
---	---------------------------------	---------

температуре (Вт)		
Условная внутренняя поверхность охлаждения активной части статора (мм <sup>2</sup> )	$S_{\text{н1}} = \pi D_1 l_1$	(1.379)

Продолжение таблицы 1.55

Условный периметр поперечного сечения (мм): трапецидального полузакрытого паза	$\Pi_1 = 2h_{\text{н1}} + b_1 + b_2$	(1.380)
прямоугольного полуоткрытого и открытого пазов	$\Pi_1 = 2(h_{\text{н1}} + b_{\text{н1}})$	(1.381)
Условная поверхность охлаждения (мм <sup>2</sup> ): пазов	$S_{\text{и.н1}} = z_1 \Pi_1 l_1$	(1.382)
лобовых частей обмотки	$S_{\text{л1}} = 4\pi D_1 l_{\text{Б1}}$	(1.383)
двигателей без охлаждающих ребер на станине	$S_{\text{маш}} = \pi D_{\text{н1}} (l_1 + 2l_{\text{Б1}})$	(1.384)
двигателей с охлаждающими ребрами на станине	$S_{\text{маш.р}} = (\pi D_{\text{н1}} + 8n_{\text{р}} h_{\text{р}})(l_1 + 2l_{\text{Б1}})$	(1.385)
Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки и от потерь в стали, отнесенных к внутренней поверхности охлаждения активной части статора (Вт / мм <sup>2</sup> )	$p_{\text{н1}} = k(P'_{\text{М1}} 2l_1 / l_{\text{ср1}} + P_{\text{с}\Sigma}) / S_{\text{н1}}$	(1.386)
То же, от потерь в активной части обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения пазов	$p_{\text{и.н1}} = (P'_{\text{М1}} 2l_1 / l_{\text{ср1}}) / S_{\text{и.н1}}$	(1.387)
То же, от потерь в лобовых частях обмотки, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки	$p_{\text{л1}} = (P'_{\text{М1}} 2l_{\text{л1}} / l_{\text{ср1}}) / S_{\text{л1}}$	(1.388)
Окружная скорость ротора (м / с)	$v_2 = \pi D_{\text{н2}} n_1 / 60000$	(1.389)
Повышение температуры внутренней поверхности активной части статора над температурой воздуха внутри машины (°C)	$\Delta t_{\text{н1}} = p_{\text{н1}} / \alpha_1$	(1.390)
Перепад температуры в изоляции паза и катушек из круглых проводов (°C)	$\Delta t_{\text{и.н1}} = p_{\text{и.н1}} [b_{\text{н1}} / \lambda_{\text{эв}} + (b_1 + b_2) / (16\lambda'_{\text{эв}})]$	(1.391)
То же в изоляции паза и жестких катушек или полукатушек	$\Delta t_{\text{и.н1}} = p_{\text{и.н1}} b_{\text{н1}} / \lambda_{\text{эв}}$	(1.392)

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри двигателя ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t_{\text{л1}} = p_{\text{л1}} / \alpha_1$	(1.393)
Перепад температуры в изоляции лобовых частей катушек из круглых проводов ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t_{\text{и.л1}} = p_{\text{л1}} [b_{\text{и.л1}} / \lambda_{\text{экр}} + h_{\text{ил}} / (12\lambda'_{\text{экр}})]$	(1.394)

*Продолжение таблицы 1.55*

То же, из жестких катушек или полукатушек	$\Delta t_{\text{и.л1}} = p_{\text{л1}} (b_{\text{и.л1}} / \lambda_{\text{экр}})$	(1.395)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой воздуха внутри двигателя ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t'_1 = (\Delta t_{\text{л1}} + \Delta t_{\text{и.л1}}) \frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}} + (\Delta t_{\text{л1}} + \Delta t_{\text{и.л1}}) \frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}}$	(1.396)
Потери в двигателе со степенью защиты IP23, передаваемые воздуху внутри двигателя, (Вт)	$P'_{\Sigma} = k \left( P'_{\text{м1}} \frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}} + P_{\text{с}\Sigma} \right) + P'_{\text{м1}} \frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} + P'_{\text{м2}} + P_{\text{мх}\Sigma} + P_{\text{д}}$	(1.397)
То же, для IP44	$P'_{\Sigma} = k \left( P'_{\text{м1}} \frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}} + P_{\text{с}\Sigma} \right) + P'_{\text{м1}} \frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} + P'_{\text{м2}} + 0,1 P_{\text{мх}\Sigma} + P_{\text{д}}$	(1.398)
Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой наружного воздуха без охлаждающих ребер на станине или с ребрами ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t_{\text{в}} = P'_{\Sigma} / (S_{\text{маш}} \alpha_{\text{в}}); \left. \Delta t_{\text{в}} = P'_{\Sigma} / (S_{\text{маш.р}} \alpha_{\text{в}}) \right\}$	(1.399)
Среднее превышение температуры обмотки над температурой наружного воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t_1 = \Delta t'_1 + \Delta t_{\text{в}}$	(1.400)

Здесь  $n_p$  и  $h_p$  – количество и высота охлаждающих ребер станины по данным [1];  $k$  – из таблицы 1.54;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи поверхности статора определяют из рисунка 1.24;  $\alpha_v$  – коэффициент подогрева воздуха – находят по рисунку 1.25;  $b_{и1}$  – односторонняя толщина изоляции в пазу статора (при полукрытых и открытых пазах  $b_{и1} = (b_{п1} - N_{ш}b) / 2$ , при полукрытых  $b_{и1}$  в § 1.4;  $b_{ил1}$  – односторонняя толщина изоляции катушек в лобовой части (приложение А (таблицы А.16 – А.21);  $\lambda_{эkv} = 16 \cdot 10^{-5}$  Вт / (мм·град) – эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции в пазу, включающий воздушные прослойки;  $\lambda'_{эkv}$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции катушки, зависящий от отношения диаметров изолированного и неизолированного провода  $d/d'$  (рисунок 1.26).

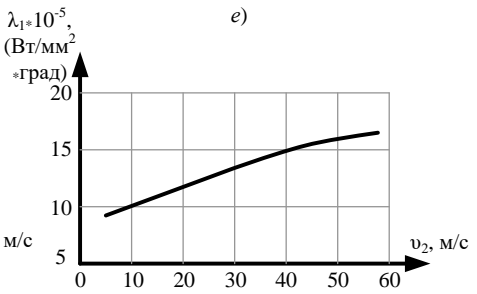
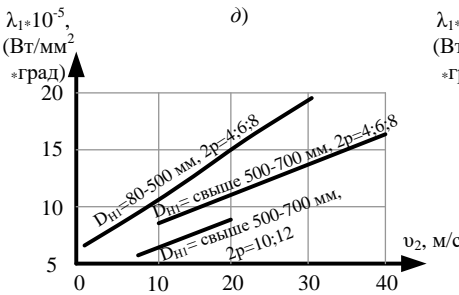
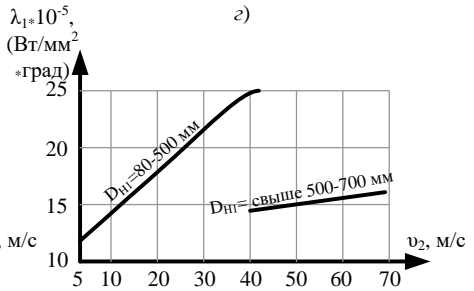
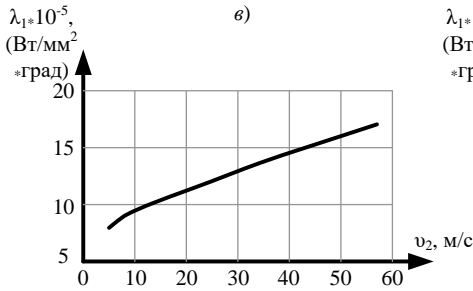
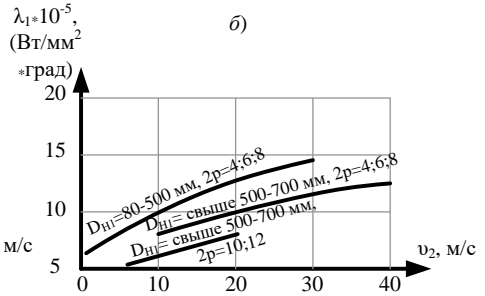
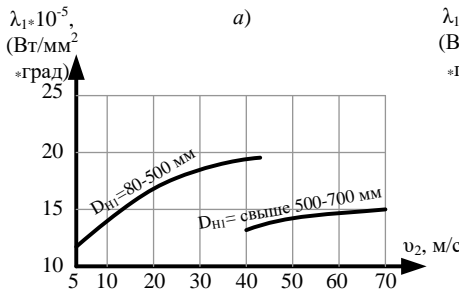


Рисунок 1.24 – Средние значения  $\lambda_1 = f(v_2)$ :

- a* – исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141,  $U \leq 600$  В,  $2p = 2$ ;  
*б* – то же, что *a*, но  $2p = 4, 6, 8, 10, 12$ ; *в* – IP44, IC0151,  $U = 6000$  В,  $2p = 4, 6, 8, 10, 12$ ;  
*г* – IP23, IC01,  $U \leq 660$  В,  $2p = 2$ ; *д* – то же, что *г*, но  $2p = 4, 6, 8, 10, 12$ ;  
*е* – IP23, IC01,  $U = 6000$  В,  $2p = 4, 6, 8, 10, 12$

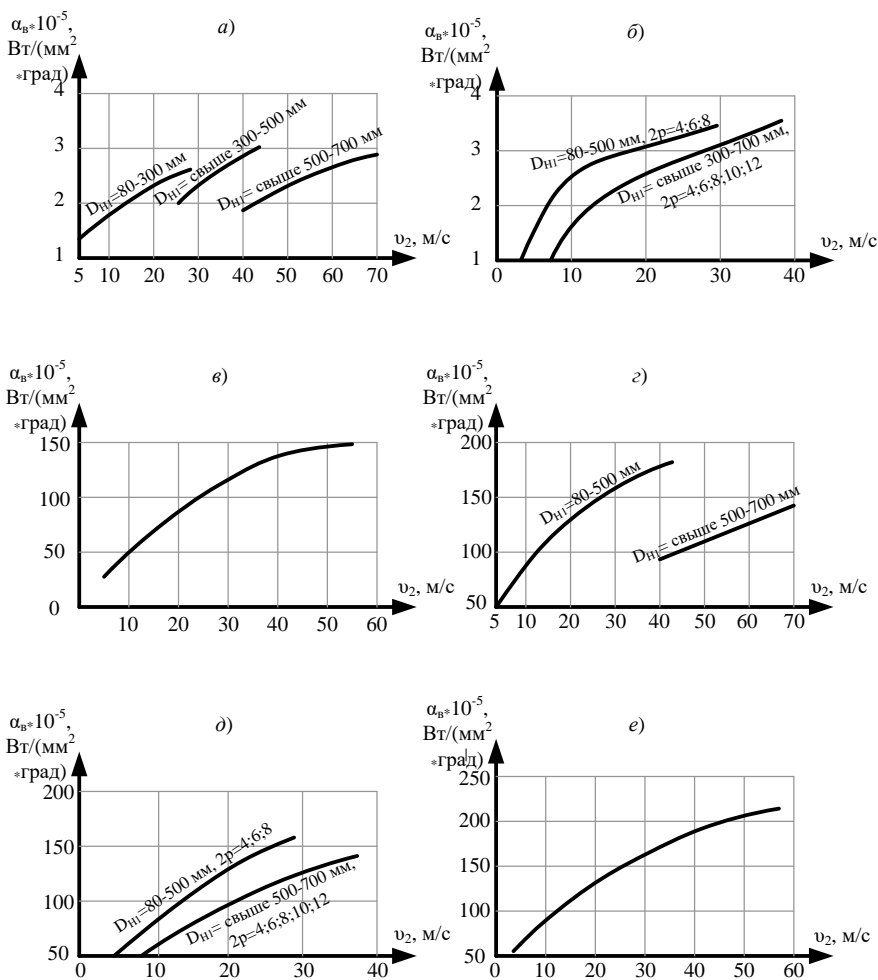


Рисунок 1.25 – Средние значения  $\alpha_{\text{в}} = f(v_2)$ :

- а – исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141,  $U \leq 660 \text{ В}$ ,  $2p = 2$ ;  
б – то же, что а, но  $2p = 4, 6, 8, 10, 12$ ; в – IP44, IC0151,  $U = 6000 \text{ В}$ ,  $2p = 4, 6, 8, 10, 12$ ;  
г – IP23, IC01,  $U \leq 660 \text{ В}$ ,  $2p = 2$ ; д – то же, что г, но  $2p = 4, 6, 8, 10, 12$ ;  
е – IP23, IC01,  $U = 6000 \text{ В}$ ,  $2p = 4, 6, 8, 10, 12$ .

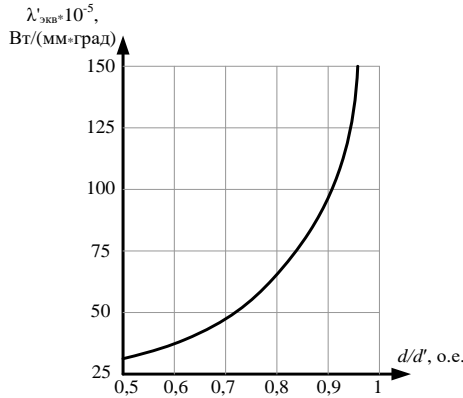


Рисунок 1.26 – Средние значения  $\lambda'_{\text{экр}} = f(d/d')$

**Обмотка фазного ротора.** Тепловой расчет для определения превышения температуры фазного ротора проводят в последовательности, указанной в таблице 1.56.

Таблица 1.56 – Формулы расчета превышения температуры фазного ротора

Потери в обмотке ротора при максимальной допускаемой температуре (Вт)	$P'_{M2} = m_1 (I_2'')^2 m_1' r_2''$	(1.401)
Условная наружная поверхность охлаждения активной части ротора (мм <sup>2</sup> )	$S_{n2} = \pi D_{n2} l_2$	(1.402)
Условный периметр поперечного сечения полуоткрытого паза (мм)	$\Pi_2 = 2(h_{n2} + b_{n2})$	(1.403)
Условная поверхность охлаждения пазов и лобовых частей обмотки (мм <sup>2</sup> )	$S_{и.п2} = z_2 \Pi_2 l_2$	(1.404)
	$S_{л2} = 4\pi D_{n2} l_{B2}$	(1.405)
Удельный тепловой поток от потерь в активной части обмотки отнесенных к наружной поверхности охлаждения активной части ротора (Вт / мм <sup>2</sup> )	$p_{n2} = P'_{M2} (2l_2 / l_{cp2}) / S_{n2}$	(1.406)
То же, отнесенных к поверхности охлаждения пазов	$p_{и.п2} = P'_{M2} (2l_2 / l_{cp2}) / S_{и.п2}$	(1.407)
То же, от потерь в лобовых частях обмотки ротора, отнесенных к поверхности охлаждения лобовых частей обмотки	$p_{л2} = P'_{M2} (2l_{л2} / l_{cp2}) / S_{л2}$	(1.408)
Превышение температуры наружной поверхности активной части ротора над температурой воздуха внутри машины (°C)	$\Delta t_{n2} = P_{n2} / \alpha_2$	(1.409)





Продолжение таблицы 1.56

Перепад температуры в изоляции проводов и пазов ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t_{\text{и.п2}} = P_{\text{и.п2}} b_{\text{и2}} / \lambda_{\text{экв}}$	(1.410)
Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри двигателя ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t_{\text{л2}} = P_{\text{л2}} / \alpha_2$	(1.411)
Перепад температуры в изоляции проводов и катушек лобовых частей обмотки ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t_{\text{и.л2}} = P_{\text{л2}} b_{\text{и.л2}} / \lambda_{\text{экв}}$	(1.412)
Среднее превышение температуры обмотки: над температурой воздуха внутри двигателя	$\Delta t'_2 = (\Delta t_{\text{п2}} + \Delta t_{\text{и.п2}}) 2l_2 / l_{\text{ср2}} + (\Delta t_{\text{л2}} + \Delta t_{\text{и.л2}}) 2l_{\text{л2}} / l_{\text{ср2}}$	(1.413)
над температурой наружного воздуха соответственно ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta t_2 = \Delta t'_2 + \Delta t_{\text{в}}$	(1.414)

Здесь  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи поверхности ротора (рисунок 1.27);  $b_{\text{и2}}$  – односторонняя толщина изоляции в пазу ротора (§ 1.4);  $b_{\text{и.л2}}$  – односторонняя толщина изоляции катушек в лобовой части (приложение А (таблицы А.14 и А.15))

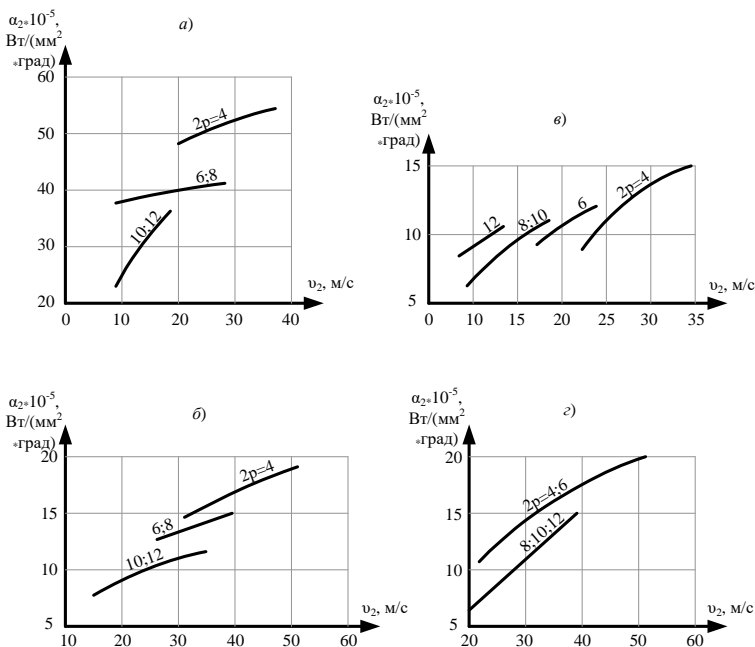


Рисунок 1.27 – Среднее значение  $\alpha_2 = f(v_2)$ :

а – исполнение по защите IP44, способ охлаждения IC0141,  $D_{\text{н1}}=380 \div 660 \text{ мм}$ ,  $U \leq 660 \text{ В}$ ;

б – IP44, IC0141,  $D_{\text{н1}}=661 \div 990 \text{ мм}$ ,  $U=6000 \text{ В}$ ; в – IP23, IC01,  $D_{\text{н1}}=380 \div 660 \text{ мм}$ ,  $U \leq 660 \text{ В}$ ;

з – IP23, IC01,  $D_{\text{н1}}=661 \div 990 \text{ мм}$ ,  $U=6000 \text{ В}$

**Вентиляционный расчет асинхронных двигателей с радиальной вентиляцией.** Рассчитывают двигатели со степенью защиты IP23 и со способом охлаждения IC01, а также двигатели со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 в соответствии с изложенным в [1]. Расход воздуха  $V'_в$ , обеспечиваемый вентиляционным устройством, должен быть не менее необходимого расхода воздуха  $V_в$ . При этом следует учитывать, что эмпирические формулы для расчета  $V'_в$  двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 действительны лишь при условии реализации в конструкции машины рекомендаций, приведенных в главе 3 [1] в части диаметра наружного вентилятора, длины и количества его лопаток.

Вентиляционный расчет двигателей проводят в последовательности, указанной в таблице 1.57.

*Таблица 1.57 – Формулы для вентиляционного расчета*

<b>Двигатели со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01 (радиальная система вентиляции)</b>	
Необходимый расход воздуха ( $\text{м}^3 / \text{с}$ )	$V_в = P'_\Sigma / (c_v \Delta t'_в)$
Коэффициент, зависящий от частоты вращения $n_1$	$k_1 = 3,5^4 \sqrt{(n_1 / 1000)^3 (n_k I_k + 100)} / 100$
Расход воздуха, который может быть обеспечен радиальной вентиляцией ( $\text{м}^3 / \text{с}$ )	$V'_в = k_1 (D_{н2} / 100)^2 10^{-2}$
Напор воздуха, развиваемый при радиальной вентиляции (Па)	$H = 7,85 (n_1 / 1000)^2 (D_{н2} / 100)^2$
<b>Двигатели со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141</b>	
Наружный диаметр корпуса (мм)	$D_{\text{корп}}$ – по таблице 1.3
Коэффициент, учитывающий изменение теплоотдачи по длине корпуса двигателя	$k_2 = 2,2^4 \sqrt{(n_1 / 1000)^3} \sqrt{D_{\text{корп}} / 100}$
Необходимый расход воздуха ( $\text{м}^3 / \text{с}$ )	$V_в = k_2 P'_\Sigma / (c_v \Delta t'_в)$
Расход воздуха, который может быть обеспечен наружным вентилятором ( $\text{м}^3 / \text{с}$ )	$V'_в \approx 0,6 (n_1 / 1000) (D_{\text{корп}} / 100)^3 10^{-2}$
Напор воздуха, развиваемый наружным вентилятором (Па)	$H = 12,3 (n_1 / 1000)^2 (D_{\text{корп}} / 100)^2$

В результате расчета следует убедиться, что удовлетворяется неравенство  $V'_в > V_в$ . Иначе потребуются изменить элементы конструкции двигателя с целью увеличения  $V'_в$  до определенного значения.

В таблице 1.58 приведен пример теплового и вентиляционного расчетов.

Таблица 1.58 – Пример теплового и вентиляционного расчетов

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1	Двигатель №2
<b>Тепловой расчет</b>				
371	$P'_{м1}$ , Вт	(1.378)	$3 \cdot 14,9^2 \cdot 1,4 \cdot 0,524 = 489$	$3 \cdot 171^2 \cdot 1,48 \cdot 0,0384 = 4985$
372	$S_{п1}$ , мм <sup>2</sup>	(1.379)	$\pi \cdot 153 \cdot 115 = 0,55 \cdot 10^5$	$\pi \cdot 422 \cdot 225 = 3 \cdot 10^5$
373	$П_1$ , мм	(1.380)	$2 \cdot 18,5 + 99 + 7,07 = 54$	–
374	$П_1$ , мм	(1.381)	–	$2 (38 + 9,5) = 95$
375	$S_{и.п1}$ , мм <sup>2</sup>	(1.382)	$36 \cdot 54 \cdot 115 = 2,2 \cdot 10^5$	$72 \cdot 95 \cdot 225 = 15,4 \cdot 10^5$
376	$S_{п1}$ , мм <sup>2</sup>	(1.383)	$4 \cdot \pi \cdot 153 \cdot 62,65 = 1,2 \cdot 10^5$	$4 \cdot \pi \cdot 422 \cdot 116 = 6,2 \cdot 10^5$
377	$h_p$ , мм	§ 3.10 [1]	$0,6 \sqrt[4]{132^2} = 23$	–
378	$n_p$	§ 1.10	$0,6 \sqrt[3]{132} = 8,2$ принимаем $n_p = 12$	–
379	$S_{маш.p}$ , мм <sup>2</sup>	(1.385)	$(\pi \cdot 233 + 8 \cdot 12 \cdot 23) (115 + 2 \cdot 62,65) = 7 \cdot 10^5$	–
380	$S_{маш.p}$ , мм <sup>2</sup>	(1.384)	–	$\pi \cdot 590 (225 + 2 \cdot 116) = 8,5 \cdot 10^5$
381	$p_{п1}$ , Вт / мм <sup>2</sup>	(1.386)	$\frac{0,21 \left( 489 \frac{2 \cdot 115}{648} + 243,6 \right)}{0,55 \cdot 10^5} = 1,6 \cdot 10^{-3}$	$\frac{0,77}{3 \cdot 10^5} \left( 4985 \frac{2 \cdot 225}{1094} + 1537 \right) = 9,2 \cdot 10^{-3}$
382	$p_{и.п1}$ , Вт / мм <sup>2</sup>	(1.387)	$\frac{489 \frac{2 \cdot 115}{648}}{2,2 \cdot 10^5} = 0,8 \cdot 10^{-3}$	$\frac{4985 \frac{2 \cdot 225}{1094}}{15,4 \cdot 10^5} = 1,3 \cdot 10^{-3}$
383	$p_{п1}$ , Вт / мм <sup>2</sup>	(1.388)	$\frac{489 \frac{2 \cdot 209}{648}}{1,2 \cdot 10^5} = 2,6 \cdot 10^{-3}$	$\frac{4985 \frac{2 \cdot 322}{1094}}{6,2 \cdot 10^5} = 4,7 \cdot 10^{-3}$
384	$V_2$ , м / с	(1.389)	$\frac{\pi \cdot 152,3 \cdot 1500}{60000} = 12$	$\frac{\pi \cdot 420,2 \cdot 1000}{60000} = 22$
385	$\Delta t_{п1}$ , °C	(1.390) рисунок 1.24	$\frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{10,4 \cdot 10^{-5}} = 15,4$	$\frac{9,2 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 10^{-5}} = 76,7$
386	$\Delta t_{и.п1}$ , °C	(1.391) рисунок 1.26	$0,8 \cdot 10^{-3} \left( \frac{0,25}{16 \cdot 10^{-5}} + \frac{(9,9 + 7,07)}{16 \cdot 130 \cdot 10^{-5}} \right) = 1,9$	–

Продолжение таблицы 1.58

387	$b_{и}, \text{мм}$	§ 1.13	—	$\frac{9,5-1 \cdot 3,35}{2} = 3,1$
388	$\Delta t_{и.л1}, ^\circ\text{C}$	(1.392)	—	$1,3 \cdot 10^{-3} \frac{3,1}{16 \cdot 10^{-5}} = 25,2$
389	$\Delta t_{л1}, ^\circ\text{C}$	(1.393)	$2,6 \cdot 10^{-3} / (10,4 \cdot 10^{-5}) = 25$	$4,7 \cdot 10^{-3} / (12 \cdot 10^{-5}) = 39$
390	$\Delta t_{и.л1}, ^\circ\text{C}$	(1.394)	$2,6 \cdot 10^{-3} \frac{18,5}{12 \cdot 130 \cdot 10^{-5}} = 7,1$	—
391	$\Delta t_{и.л1}, ^\circ\text{C}$	(1.395)	—	$4,7 \cdot 10^{-3} \frac{0,6}{16 \cdot 10^{-5}} = 17,6$
392	$\Delta t'_{1}, ^\circ\text{C}$	(1.396)	$(25 + 7,1) \frac{2 \cdot 209}{648} +$ $+ (15,4 + 1,9) \frac{2 \cdot 115}{648} = 26,8$	$(76,7 + 25,2) \frac{2 \cdot 225}{1094} +$ $+ (39 + 17,6) \frac{2 \cdot 322}{1094} =$ $= 75,2$
393	$P'_{\Sigma}, \text{Вт}$	(1.398) таблица 1.54	$0,21 \left( 489 \frac{2 \cdot 115}{648} + 243,6 \right) + 215 +$ $+ 489 \frac{2 \cdot 209}{648} + 0,1 \cdot 66,3 + 43 = 668$	—
394	$P'_{\Sigma}, \text{Вт}$	(1.397) таблица 1.54	—	$0,77 \left( 4985 \frac{2 \cdot 225}{1094} + 1537 \right) +$ $+ 4985 \frac{2 \cdot 322}{1094} + 5227 +$ $+ 488 + 860 = 12270$
395	$\Delta t_{в}, ^\circ\text{C}$	(1.399) таблица 1.54	$668 / (7 \cdot 10^5 \cdot 2,55 \cdot 10^{-5}) = 37,4$	$12270 / (8,5 \cdot 10^5 \times$ $107 \times 10^{-5}) = 13,5$
396	$\Delta t_1, ^\circ\text{C}$	(1.400)	$26,8 + 37,4 = 64,2$	$75,2 + 13,5 = 88,7$
397	$P'_{м2}, \text{Вт}$	(1.401)	$3 \cdot 12,5^2 \cdot 1,4 \cdot 0,328 = 215$	$3 \cdot 155^2 \cdot 1,48 \cdot 0,049 = 5227$
398	$S_{п2}, \text{мм}^2$	(1.402)	—	$\pi \cdot 420,2 \cdot 230 = 3 \cdot 10^5$
399	$П_2, \text{мм}$	(1.403)	—	$2 (44,3 + 5,18) = 100$
400	$S_{и.п2}, \text{мм}^2$	(1.404)	—	$81 \cdot 100 \cdot 230 = 19 \cdot 10^5$
401	$S_{л2}, \text{мм}^2$	(1.405)	—	$4 \cdot \pi \cdot 420,2 \cdot 106,2 =$ $= 5,6 \cdot 10^5$
402	$p_{п2},$ $\text{Вт} / \text{мм}^2$	(1.406)	—	$\frac{5227 \frac{2 \cdot 230}{1121}}{3 \cdot 10^5} = 7,1 \cdot 10^{-3}$
403	$p_{и.п2},$ $\text{Вт} / \text{мм}^2$	(1.407)	—	$\frac{5227 \frac{2 \cdot 230}{1121}}{19 \cdot 10^5} = 1,1 \cdot 10^{-3}$

Продолжение таблицы 1.58

404	$p_{л2},$ Вт / мм <sup>2</sup>	(1.408)	—	$\frac{5227 \cdot \frac{2 \cdot 330,2}{1121}}{5,6 \cdot 10^5} = 6 \cdot 10^{-3}$
405	$\Delta t_{л2}, ^\circ\text{C}$	(1.409) рисунок 1.27	—	$7,1 \cdot 10^{-3} / (12,3 \cdot 10^{-5}) =$ $= 57,7$
406	$\Delta t_{и.л2}, ^\circ\text{C}$	(1.410)	—	$1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 / (16 \cdot 10^{-5}) =$ $= 11$
407	$\Delta t_{л2}, ^\circ\text{C}$	(1.411)	—	$6 \cdot 10^{-3} / (12,3 \cdot 10^{-5}) = 48,8$
408	$\Delta t_{и.л2}, ^\circ\text{C}$	(1.412)	—	$\frac{6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,22}{16 \cdot 10^{-5}} = 8,25$
409	$\Delta t'_2, ^\circ\text{C}$	(1.413)	—	$(57,7 + 11) \frac{2 \cdot 230}{1121} +$ $+ (48,8 + 8,25) \cdot \frac{2 \cdot 330,2}{1121} = 61,8$
410	$\Delta t_2, ^\circ\text{C}$	(1.414)	—	$61,8 + 13,5 = 75,3$
<b>Вентиляционный расчет</b>				
411	$V_{в},$ м <sup>3</sup> / с	$P'_\Sigma / (c_{в} \Delta t'_{в})$	—	$\frac{12270}{1100 \cdot 2 \cdot 13,5} = 0,41$
412	$k_1$	$3,5 \sqrt[4]{(n_1 / 1000)^3} \times$ $\times (n_k l_k + 100) / 100$	—	$3,5 \sqrt[4]{(1000 / 1000)^3} \cdot$ $\cdot (0 + 100) / 100 = 3,5$
413	$V'_{в},$ м <sup>3</sup> / с	$k_1 (D_{н2} / 100)^2 10^{-2}$	—	$3,5 (420,2 / 100)^2 10^{-2} =$ $= 0,62$
414	$H, \text{Па}$	$7,85 (n_1 / 1000)^2 \times$ $\times (D_{н2} / 100)^2$	—	$7,85 (1000 / 1000)^2 \times$ $\times (420,2 / 100)^2 = 140$
415	$D_{корп},$ мм	по таблице (1.3)	$2 (132 - 6) = 252$	—
416	$k_2$	$2,2 \sqrt[4]{(n_1 / 1000)^3} \times$ $\times \sqrt{D_{корп} / 100}$	$2,2 \sqrt[4]{(1500 / 1000)^3} \cdot$ $\cdot \sqrt{252 / 100} = 4,78$	—
417	$V_{в},$ м <sup>3</sup> / с	$k_2 P'_\Sigma / (c_{в} \Delta t'_{в})$	$4,78 \cdot 668 / 1100 \cdot 2 \cdot 37,4 =$ $0,04$	—
418	$V'_{в},$ м <sup>3</sup> / с	$0,6 (n_1 / 1000) \times$ $\times (D_{корп} / 100)^3 10^{-2}$	$0,6 \left( \frac{1500}{1000} \right) \left( \frac{252}{100} \right)^3 \cdot 10^{-2} = 0,144$	—
419	$H, \text{Па}$	$12,3 (n_1 / 1000)^2 \times$ $\times (D_{корп} / 100)^2$	$12,3 \left( \frac{1500}{1000} \right)^2 \left( \frac{252}{100} \right)^2 = 175,7$	—

### 1.14 Масса двигателя и динамический момент инерции ротора

Важными техническими показателями асинхронного двигателя являются его масса и динамический момент инерции ротора. Значение последнего необходимо для расчета времени разгона или остановки электродвигателя. Его точное значение может быть определено расчетом динамических моментов инерции отдельных деталей ротора. Приближенное значение динамического момента инерции короткозамкнутого ротора ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ )

$$J_{\text{И,д}} = (0,55 \div 0,65) D_{\text{H2}}^4 l_2 \cdot 10^{-12}. \quad (1.415)$$

Для фазного ротора значение динамического момента инерции, определенное по (1.415), должно быть увеличено на 5%.

До разработки чертежей на двигатель определение его массы можно выполнить по приближенным формулам в последовательности, указанной в таблице 1.59.

Таблица 1.59 – Формулы для разработки чертежей на двигатель определения его массы

Масса изолированных проводов обмотки статора (кг): при круглом поперечном сечении	$m_{\text{м1}} = [7,55 + 1,35(d'/d)^2] z_1 \cdot \frac{N_{\text{н1}}}{2} l_{\text{ср1}} c s \cdot 10^{-6}$	(1.416)
при прямоугольном поперечном сечении	$m_{\text{м1}} = (7,55 + 1,35 \frac{s'}{s}) z_1 \cdot \frac{N_{\text{н1}}}{2} l_{\text{ср1}} c s \cdot 10^{-6}$	(1.417)
Масса алюминия короткозамкнутого ротора с литой или сварной клеткой (кг)	$m_{\text{ал2}} = 2,7 [z_2 s_{\text{ст}} l_2 + 2\pi D_{\text{кст.ср}} s_{\text{кл}} + 1,1 N_{\text{л}} (l_{\text{л}} - l_{\text{кл}}) h_{\text{л}} b_{\text{л}}] \cdot 10^{-6}$	(1.418)
Масса неизолированных проводов обмотки фазного ротора (кг)	$m_{\text{м2}} = 8,9 z_2 (N_{\text{п2}} / 2) l_{\text{ср2}} s \cdot 10^{-6}$	(1.419)
Масса стали сердечников статора и ротора (кг)	$m_{\text{с\sigma}} = 7,8 l_k \cdot 10^{-6} \times [0,785(D_{\text{н1}}^2 - D_2^2) - z_1 s_{\text{п1}} - z_2 s_{\text{п2}} - \frac{\pi d_{\text{п2}}^2}{4} n_{\text{к2}}]$	(1.420)
Масса изоляции статора (кг): при трапециевидных полужакрытых пазах	$m_{\text{и1}} = 1,35(l_1 + 20)(2h_{\text{п1}} + 3b_{\text{п}}) b_{\text{и1}} z_1 \cdot 10^{-6}$	(1.421)
при прямоугольных полуоткрытых и открытых пазах	$m_{\text{и1}} = 1,35 z_1 [(l_1 + 20)(2b_{\text{и1}} h_{\text{п1}} + 2h_{\text{и1}} b_{\text{п1}}) + l_{\text{л1}} (2b_{\text{и.л1}} h_{\text{п1}} + h_{\text{и.л1}} b_{\text{п1}})] \cdot 10^{-6}$	(1.422)
Масса изоляции фазного ротора (кг)	$m_{\text{и2}} = 1,35 z_2 [(l_2 + 20)(2b_{\text{и2}} h_{\text{п2}} + h_{\text{и2}} b_{\text{п2}}) + l_{\text{л2}} (2b_{\text{и.л2}} h_{\text{п2}} + h_{\text{и.л2}} b_{\text{п2}})] \cdot 10^{-6}$	(1.423)

Продолжение таблицы 1.59

Масса конструкционных материалов двигателя со степенью защиты IP44 (кг): $h \leq 200$ мм, станина и щиты из алюминиевого сплава, КЗР;	$m_k = [(0,21 \div 0,28)D_{н1}^2 l_1 + (2,2 \div 3,1)D_{н1}^3] \cdot 10^{-6}$	(1.424)
$h \leq 400$ мм, станина и щиты чугунные, ротор короткозамкнутый;	$m_k = [(0,55 \div 0,75)D_{н1}^2 l_1 + (2,3 \div 3,1)D_{н1}^3] \cdot 10^{-6}$	(1.425)
то же, ротор фазный;	$m_k = [(0,55 \div 0,75)D_{н1}^2 l_1 + (2,8 \div 3,8)D_{н1}^3] \cdot 10^{-6}$	(1.426)
$h \geq 400$ мм, сварное исполнение с распределенным трубчатым охладителем, ротор короткозамкнутый;	$m_k = (1,8 \div 2,5)D_{н1}^2 l_1 \cdot 10^{-6} + (130 \div 170)D_{н1}^{1,3} \cdot 10^{-3}$	(1.427)
то же, ротор фазный;	$m_k = (1,8 \div 2,5)D_{н1}^2 l_1 \cdot 10^{-6} + (150 \div 210)D_{н1}^{1,3} \cdot 10^{-3}$	(1.428)
Масса конструкционных материалов двигателя со степенью защиты IP23 (кг): $h \leq 250$ мм, станина и щиты чугунные, ротор короткозамкнутый;	$m_k = [(0,9 \div 1,2)D_{н1}^2 l_1 + (1,8 \div 2,5)D_{н1}^3] \cdot 10^{-6}$	(1.429)
$h \leq 355$ мм, сварное исполнение, ротор короткозамкнутый;	$m_k = (0,9 \div 1,2)D_{н1}^2 l_1 \cdot 10^{-6} + (10 \div 15)D_{н1}^{1,6} \cdot 10^{-3}$	(1.430)
то же, ротор фазный	$m_k = (0,9 \div 1,2)D_{н1}^2 l_1 \cdot 10^{-6} + (12 \div 16)D_{н1}^{1,6} \cdot 10^{-3}$	(1.431)
$h \geq 400$ мм, станина и щиты чугунные, КЗР;	$m_k = (1,9 \div 2,5)D_{н1}^2 l_1 \cdot 10^{-6} + (13 \div 17)D_{н1}^{1,6} \cdot 10^{-3}$	(1.432)
То же, ротор фазный;	$m_k = (1,9 \div 2,5)D_{н1}^2 l_1 \cdot 10^{-6} + (14 \div 19)D_{н1}^{1,6} \cdot 10^{-3}$	(1.433)
Масса двигателя с короткозамкнутым ротором (кг)	$m_{ДВ} = m_{м1} + m_{ал2} + m_{с\Sigma} + m_{н1} + m_k$	(1.434)
То же, с фазным ротором	$m_{ДВ} = m_{м1} + m_{м2} + m_{с\Sigma} + m_{н1} + m_{и2} + m_k$	(1.435)



Здесь  $S' = (a + \Delta_{и}) (b + \Delta_{и})$ ;  $b_{п} = 0,5 (b_1 + b_2)$  – средняя ширина паза;  $b_{и1}$ ,  $2b_{и1}$  – из § 1.4;  $2b_{и2}$  – из § 1.6;  $2b_{и.л1}$  и  $2b_{и.л2}$  – двусторонняя толщина изоляции по ширине в лобовой части обмотки статора из приложения А (таблицы А.17 и А.21), а фазного ротора – из приложения А (таблица А.14);  $h_{и1}$  – из § 1.4;  $h_{и2}$  – из § 1.6;  $h_{и.л1}$  и  $h_{и.л2}$  – двусторонняя толщина изоляции по высоте в лобовой части обмотки статора;  $h_{и.л1} = 2b_{и.л1}$ ;  $h_{и.л2} = 2b_{и.л2}$ ;  $N_{л}$ ,  $l_{л}$ ,  $h_{л}$  из [1];  $S_{п1}$  и  $S_{п2}$  для полузакрытых пазов – из § 1.4 и 1.5, а для прямоугольных пазов полуоткрытой и открытой формы  $S_{п1} = b_{п1}h_{п1}$ ;  $S_{п2} = b_{п2}h_{п2}$ .

Для сравнения основных технических показателей спроектированных электродвигателей с показателями аналогичных отечественных электродвигателей можно воспользоваться данными о массе, динамическом моменте инерции, энергетических и других показателях этих электродвигателей, приведенными в каталогах.

Кроме того, может быть произведена общая оценка технического уровня спроектированных двигателей по обобщенному показателю который рассчитывают в соответствии с материалами главы 7 [1].

В таблице 1.60 приведен пример расчета массы двигателя и динамического момента инерции ротора.

**Таблица 1.60 – Пример расчета массы двигателя и динамического момента инерции ротора**

№ п/п	Условные обозначения	Источник	Двигатель №1	Двигатель №2
420	$m_{м1}$ , кг	(1.416)	$\left[ 7,55 + 1,35 \left( \frac{1,405}{1,32} \right)^2 \right] \cdot 36 \frac{21}{2} - 648 \cdot 2 \cdot 1,368 \cdot 10^{-6} = 6,1$	–
421	$m_{м1}$ , кг	(1.417)	–	$\left[ 7,55 + 1,35 \frac{(1,8 + 0,15)(3,35 + 0,15)}{5,667} \right] \times 72 \cdot \frac{17}{2} 1094 \cdot 2 \cdot 5,667 \cdot 10^{-6} = 69,6$
422	$m_{ал2}$ , кг	(1.418)	$2,7 [34 \cdot 95,9 \cdot 115 + 2\pi \cdot 121,7 \cdot 326 + +1,1 \cdot 11 \times (44 - 10,65)26 \cdot 3] \cdot 10^{-6} = 1,77$	–
423	$m_{м2}$ , кг	(1.419)	–	$8,9 \cdot 81 (2 / 2) 1121 \times 58,56 \cdot 10^{-6} = 47,3$

424	$m_{\epsilon\Sigma}, \text{ кг}$	(1.420)	$7,8 \cdot 115 \cdot 0,97 [0,785 \times$ $\times (233^2 - 54^2) - 36 \cdot 137,6 -$ $- 34 \cdot 95,5 - 0] \cdot 10^{-6} = 27,9$	$7,8 \cdot 225 \cdot 0,95 \times$ $\times [(0,785 / 590^2 - 140^2) -$ $- 72(38 \cdot 9,5) - 8[(44,3 \cdot 5 \cdot 18) -$ $- \frac{\pi \cdot 40^2}{4} 12] \cdot 10^{-6} = 330$
425	$m_{\text{н1}}, \text{ кг}$	(1.421)	$1,35 (115 + 20) (2 \cdot 18,5 +$ $+ 3 \cdot 8,5) 0,25 \cdot 36 \cdot 10^{-6} = 0,1$	—

Продолжение таблицы 1.60

426	$m_{н1}$ , КГ	(1.422)	–	$1,35 \cdot 72[(225 + 20) (2,2 \cdot 38 + 4,5 \cdot 9,5) + 322 (0,6 \cdot 38 + 0,6 \cdot 9,5)] 10^{-6} = 3,9$
427	$m_{н2}$ , КГ	(1.423)	–	$1,35 \cdot 81[(230 + 20) (1,6 \times 44,3 + 4,5 \cdot 5,18) + 330,7 \times (1 \cdot 44,3 + 1 \cdot 5,18)] 10^{-6} = 4,4$
428	$m_k$ , КГ	(1.425)	$(0,6 \cdot 233^2 \cdot 115 + 2,5 \cdot 233^3) \times 10^{-6} = 35,4$	–
429	$m_k$ , КГ	(1.431)	–	$1,0 \cdot 590^2 \cdot 225 \cdot 10^{-6} + 13 \cdot 590^{1,6} \cdot 10^{-3} = 431$
430	$m_{дв}$ , КГ	(1.434)	$6,1 + 1,77 + 27,9 + 0,1 + 35,4 = 71,3$	–
431	$m_{дв}$ , КГ	(1.435)	–	$69,6 + 47,3 + 330 + 3,9 + 4,4 + 431 = 886$
432	$J_{и. д.}$ , КГ·М <sup>2</sup>	(1.415)	$0,65 \cdot 152,3^4 \cdot 115 \cdot 10^{-12} = 0,04$	$1,05 (0,65 \cdot 420,2^4 \cdot 230 \cdot 10^{-12}) = 4,9$

### 1.15 Расчет надежности обмотки статора

В гл. 6 было показано, что надежность асинхронных двигателей рассматриваемого диапазона мощностей определяется в основном надежностью обмотки статора. Для асинхронных двигателей со всыпной обмоткой разработан отраслевой стандарт для расчета надежности обмотки статора. В [1] были рассмотрены две математические модели, которые могут быть использованы при расчете надежности обмотки.

Вторая из рассмотренных моделей послужила основой для разработки отраслевого стандарта. Методика, изложенная в этом реализована в виде компьютерной программы.

Для ручного счета разработана упрощенная методика. Она приведена в настоящем параграфе.

В методику расчета введено понятие элементарного участка длиной  $l_{эл}$ . Величина  $l_{эл}$  определяется из условия равенства вероятности отказа в месте дефекта на одном из касающихся витков при учете всех возможных расстояний до дефекта на другом витке (с учетом вероятности его появления) и вероятности отказа в одном из касающихся витков с учетом дефектов на другом витке только в пределах  $l_{эл}$ . При этом считают, что все дефекты на расстоянии, меньшем или равном  $l_{эл}$ , совпадают. Для проведения расчетов по упрощенной методике необходимы данные, полученные из предыдущих расчетов. Ряд исходных данных должен быть получен экспериментально на используемых обмоточных проводах и изоляционных материалах,

примененных для корпусной и межфазной изоляции. Методы получения этих экспериментальных данных описаны в приложениях к упомянутому отраслевому стандарту. При отсутствии экспериментальных данных можно воспользоваться рекомендуемыми усредненными значениями параметров.

Вероятность безотказной работы обмотки:

$$P_{об} = P_{м.в} P_{п} P_{м.ф} \quad (1.436)$$

где  $P_{м.в}$ ,  $P_{п}$ ,  $P_{м.ф}$  – соответственно вероятности безотказной работы межвитковой, корпусной и межфазовой изоляции.

Многочисленные расчетные и экспериментальные данные показывают, что вероятность безотказной работы корпусной и межфазовой изоляции значительно выше, чем у межвитковой; для  $\tau = 10000$  ч имеем  $P_{п} P_{м.ф} \approx 0,999$ , а для  $\tau = 20000$  ч имеем  $P_{п} P_{м.ф} \approx 0,995$ . Поэтому при выполнении расчетов надежности всыпной обмотки можно ограничиться расчетом надежности межвитковой изоляции, выполнив затем корректировку результатов расчета. В соответствии с изложенным рассмотрим упрощенную методику расчета надежности межвитковой изоляции асинхронных двигателей со всыпной обмоткой (таблица 1.61).

Таблица 1.61 – Формулы для расчета

Наименование параметров и их условные обозначения	Выбор величины параметра
Наработка, для которой определяется вероятность безотказной работы $P_{об}$ , $\tau$ , ч	Задается в ТЗ (ТУ); по ГОСТ 19523–74 $\tau = 10^4$ ч при $P_{об} = 0,9$
Вероятность наличия хотя бы одного дефекта изоляции провода длиной 100 мм после укладки обмотки $q_1$	При отсутствии экспериментальных данных $q_1 = 0,1 \div 0,35$
Периметр свободной площади слоя обмотки $П$ , мм	Для двухслойной обмотки $П = b_1 + b_2 + h_{п1}$ ; для однослойной $П = b_1 + b_2 + 2h_{п1}$
Коэффициент, характеризующий качество пропитки, $k_{пр}$	При отсутствии экспериментальных данных $k_{пр} = 0,3 \div 0,7$
Длина образца провода $l_{обр}$ , мм	Можно принять $l_{обр} = 100$ мм
Среднее значение $\bar{U}_1$ , кВ и среднее квадратичное отклонение фазных коммутационных перенапряжений $\sigma_{\bar{U}_1}$ , кВ	При отсутствии экспериментальных данных $\bar{U}_1 = 1,3 \div 1,6$ кВ; $\sigma_{\bar{U}_1} = 0,3 \div 0,4$ кВ
Длина элементарного участка $l_{эл}$ , мм	Принимают $l_{эл} = 0,11 \div 0,12$ мм
Средняя допустимая температура обмотки $\bar{t}$ , °С ее среднее	Для класса В $\bar{t} = 120$ °С; для F $\bar{t} = 140$ °С; для H $\bar{t} = 165$ °С; $\sigma_{\bar{t}} = 5$ °С

квадратичное отклонение $\sigma_{\bar{t}}$ , °C <i>Продолжение таблицы 1.61</i>	
Максимально допустимая температура для данного класса нагревостойкости изоляции $t_0$ , °C	Для класса В $\bar{t}_0=130$ °C; для F $\bar{t}_0=155$ °C; для Н $\bar{t}_0=180$ °C;
Среднее значение напряжения перекрытия по поверхности изоляции промежутка толщиной, равной двусторонней толщине изоляции $\bar{U}_z$ (кВ), и среднее квадратичное отклонение его $\sigma_{\bar{U}_z}$ ,	Принимают $\bar{U}_z = (0,8 \div 1)$ кВ $\sigma_{\bar{U}_z} = (0,2 \div 0,3)$ кВ
Частота включений электродвигателя $f_{\text{вкл}}$	Принимается по ОСТ 16.0.510.037–78 в зависимости от предполагаемой группы эксплуатации. Для нормальной группы эксплуатации $t_{\text{вкл}} = (2 \div 10)$ ч <sup>-1</sup>
Коэффициенты уравнения, определяющие скорость роста дефектности витковой изоляции	При отсутствии экспериментальных данных можно принять: $c_{\text{в}} = (0,1 \div 0,2) 10^{-6}$ 1 / (мм·ч), $a_{\text{в}} = (0,04 \div 0,08)$ °C <sup>-1</sup>
<i>Примечание</i> – Для выполнения расчетов необходимы также следующие исходные данные (см. гл. 9): $k_{\text{сл}}$ – количество слоев обмотки; $N_{\text{с}} = N_{\text{плс}} / k_{\text{сл}}$ – количество элементарных витков в секции; $\Delta_{\text{пр}} = d' - d$ – двусторонняя толщина провода $c$ ; $k_{\text{п}}$ ; $z_1$ ; $a_1$ ; $l_{\text{ср1}}$ ; $d'$ .	

Расчет надежности всыпных обмоток статора асинхронного двигателя производится в последовательности, указанной в таблице 1.62.

**Таблица 1.62 – Формулы для расчета надежности всыпных обмоток статора**

Дефектность витковой изоляции до начала эксплуатации электродвигателя (мм <sup>-1</sup> )	$\lambda_0 = -\ln(1 - q_1) k_{\text{пр}} / l_{\text{обр}}$	(1.437)
Вероятность плотного касания соседних витков	$q = 0,93 \sqrt{k_{\text{п}}}$	(1.438)
Количество проводников, находящихся в наружном слое секции (по периметру секции)	$N_{\text{нар}} = Pq / d'$	(1.439)
во внутреннем слое секции	$N_{\text{ви}} = N_{\text{с}} - N_{\text{нар}}$	(1.440)

Доля пар соседних элементарных витков, принадлежащих к одному эффективному	$P_{\Pi} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{c-1}{N_c} \right)^3 \right] \left( \frac{N_c}{2N_c - c} \right)$	(1.441)
--	---	---------

Продолжение таблицы 1.62

Общая длина пар соседних витков в обмотке (мм)	$L = (1 - P_{\pi})(N_{\text{нар}} + 1,5N_{\text{вн}} - 1,5)k_{\text{сл}}l_{\text{ср}}z_1$	(1.442)
Количество последовательно соединенных секций в фазе	$n_c = z_1 k_{\text{сл}} / (6a_1)$	(1.443)
Среднее значение и среднее квадратичное отклонение величин фазных коммутационных перенапряжений на секции (кВ)	$\overline{U}_c = \overline{U}_1 / n_c$	(1.444)
	$\sigma_{\overline{U}_c} = \sigma_{\overline{U}_1} n_c$	(1.445)
Номинальное фазное напряжение, приходящееся на секцию (кВ)	$U_c = \sqrt{2}U_1 10^{-3} / n_c$	(1.446)
Вероятность отказа витковой изоляции при воздействии одного импульса перенапряжения и при условии, что на касающихся витках имеются совпадающие дефекты	$q_z = \frac{3(7 \cdot 10^{-3} U_c + 0,154 \cdot 10^{-3} \overline{U}_c)}{\Delta_{\text{пр}}} B,$ где $B = \int_0^1 F \left( \frac{k \overline{U}_c - \overline{U}_z}{\sqrt{k^2 \sigma_{\overline{U}_c}^2 + \sigma_{\overline{U}_z}^2}} \right) k(k-1)^2 dk$ – интеграл (приложение 40 [1]; пользоваться интерполяцией); $k$ – кратность коммутационных перенапряжений	(1.447)
Скорость роста дефектности витковой изоляции (мм <sup>-1</sup> )	$\exp \left[ 0,0014 f_{\text{вкл}} + a_{\text{в}} (\bar{t} - \bar{t}_0 + 0,5 a_{\text{в}} \sigma_{\bar{t}}^2) \right] \times$ $\times c_{\text{в}} = H_{\text{в}}$	(1.448)
Вероятность возникновения короткого замыкания витковой изоляции на длине касающихся витков в течение времени $\tau$	$P_1 = 2l_{\text{эл}}^2 q q_z f_{\text{вкл}} \left[ \lambda_{0\tau}^2 + \lambda_0 H_{\text{в}} \tau^2 + \frac{H_{\text{в}}^2}{3} \tau^3 \right]$	(1.449)
Вероятность отказа межвитковой изоляции в течение времени $\tau$	$Q_{\text{М.В}} = 1 - (1 - P_1)^{L/l_{\text{эл}}}$	(1.450)
Вероятность безотказной работы межвитковой изоляции в течение времени $\tau$	$P_{\text{М.В}} = 1 - Q_{\text{М.В}}$	(1.451)
Вероятность безотказной работы обмотки статора $P_{\text{об}}$ за время $\tau$ (для $\tau = 10\,000$ ч имеем $P_{\pi} P_{\text{М.ф}} = 0,999$ ; для $\tau = 20\,000$ ч – $P_{\pi} P_{\text{М.ф}} = 0,995$ )	$P_{\text{об}}$ – по (1.436)	

## 1.16 Технические данные асинхронных двигателей, выпускаемых Ярославским электромашиностроительным заводом (ОАО, ELDIN)

### Общая характеристика серии АД

Двигатели трехфазного переменного тока с короткозамкнутым ротором выпускаются в двух исполнениях : для серии RA – градации мощности и присоединительных размеров по DIN 42673 / DIN 42677; для серии A, AIP – градации мощности и присоединительных размеров по ГОСТ 28330.

В соответствии с ГОСТ 28173 (DIN VDE 0530) при номинальном напряжении и частоте двигатели допускают перегрузки  $1,5I_n$  в течение 2 мин и  $1,6I_n$  в течение 15 с.

Двигатели могут работать как при постоянной частоте, так и в режиме частотного регулирования.

При высоте оси вращения  $h = 71 - 132$  мм двигатели имеют литую чугунную станину, при  $h \geq 132$  мм – алюминиевую.

Наиболее распространенные конструктивные исполнения электрических машин по способу монтажа в соответствии с МЭК 34–7 приведены на рисунке 1.28:

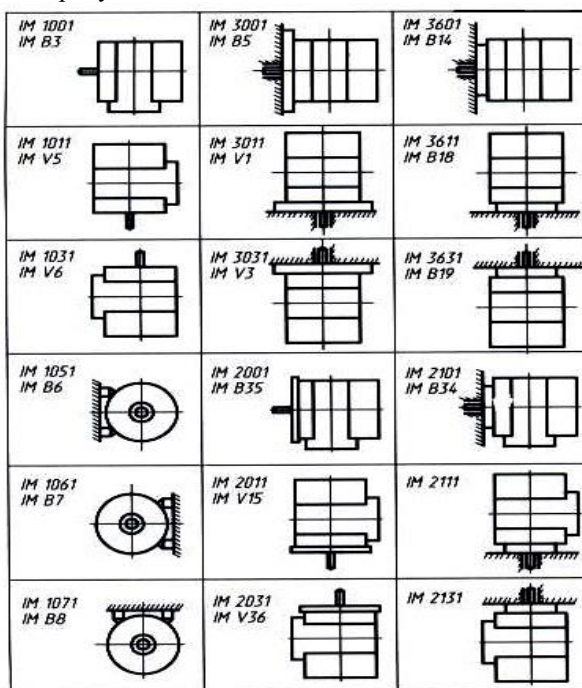


Рисунок 1.28 – Наиболее распространенные конструктивные исполнения АД по способу монтажа



Технические данные трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором типа RA (привязка мощностей к установочно-присоединительным размерам по стандартам CENELEC, DIN) приведены в таблице 1.63:

Таблица 1.63 – Технические данные АД с КЗР типа RA

$h$ , мм	$P_2$ , кВт	Тип	$m$ , кг	$n_2$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos\varphi$	$I_1$ , А	$\frac{I_{II}}{I_{II}}$	$\frac{M_{II}}{M_{II}}$	$\frac{M_{III}}{M_{III}}$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
<b>3000 об / мин (2 полюса)</b>											
71	0,37	RA71A2	7,5	2830	67,0	0,80	1,0	5,5	3,3	3,8	0,0004
71	0,35	RA71B2	8,4	2830	72,0	0,83	1,4	5,1	2,3	3,1	0,0005
80	0,75	RA80A2	8,7	2820	74,0	0,83	1,9	5,3	2,5	2,7	0,0008
80	1,1	RA80B2	10,5	2800	77,0	0,86	2,5	5,2	2,6	2,8	0,0012
90	1,5	RA90S2	13	2835	79,0	0,87	3,3	6,5	2,8	3,0	0,0010
90	2,2	RA90L2	15	2820	82,0	0,87	4,7	6,5	3,2	3,4	0,0015
100	3,0	RA100L2	17	2835	82,0	0,86	6,5	6,5	2,9	3,2	0,0038
112	4,0	RA112M2	39	2865	83,5	0,90	8,0	6,0	2,0	3,0	0,0082
132	5,5	RA132SA2	43	2880	85,0	0,89	11	6,5	2,4	3,0	0,0155
132	7,5	RA132SB2	49	2895	87,0	0,89	15	7,0	2,5	3,2	0,0185
160	11,0	RA160MA2	112	2940	87,5	0,89	22	6,8	2,0	3,3	0,04338
160	15,0	RA160MB2	116	2940	90,0	0,86	29	7,5	2,0	3,2	0,0407
160	18,5	RA160L2	133	2940	90,5	0,88	35	7,5	2,0	3,2	0,0533
180	22,0	RA180M2	147	2940	90,5	0,89	42	7,5	2,1	3,5	0,0604
200	30,0	RA200LA2	205	2940	91,5	0,90	56	7,5	1,4	2,2	0,1164
200	37,0	RA200LB2	230	2940	92,0	0,88	70	7,5	2,3	3,2	0,1400
225	45,0	RA225M2	255	2940	93,5	0,90	83	7,5	2,4	3,3	0,1790
250	55,0	RA250M2	320	3950	94,0	0,90	100	7,5	2,3	4,0	0,3000
280	75,0	RA280S2	455	2970	94,0	0,89	136	7,5	2,6	4,0	0,4000
280	90,0	RA280M2	535	2970	94,0	0,90	162	7,5	2,7	4,0	0,5000
315	110,0	RA315S2	720	2975	95,4	0,91	183	7,0	1,8	2,5	1,2100
315	132,0	RA315M2	800	2975	95,4	0,92	219	7,0	1,7	2,4	1,4400
<b>1500 об / мин (4 полюса)</b>											
71	0,25	RA71A4	7,3	1380	66,0	0,74	0,8	3,2	1,7	1,7	0,0006
71	0,37	RA71B4	7,5	1380	67,0	0,72	1,2	3,7	2,0	2,0	0,0008
80	0,55	RA80A4	80,4	1400	72,0	0,80	1,4	4,7	2,3	2,4	0,0018
80	0,75	RA80B4	10	1400	75,0	0,75	2,0	5,0	2,5	2,6	0,0023
90	1,1	RA90S4	14	1420	77,0	0,80	2,7	5,5	2,3	2,6	0,0034
90	1,5	RA90L4	16	1420	78,5	0,80	3,6	5,5	2,3	2,8	0,0042
100	2,2	RA100LA4	17	1390	78,0	0,82	5,2	5,0	2,2	2,6	0,0048
100	3,0	RA100LB4	21	1395	78,0	0,80	7,3	5,5	2,7	3,0	0,0058

Продолжение таблицы 1.63

112	4,0	RA112M4	37	1430	85,0	0,84	8,5	6,5	2,2	2,9	0,0103
132	5,5	RA132S4	45	1450	87,0	0,85	11,3	7,0	2,4	3,0	0,0229
132	7,5	RA132M4	52	1455	88,0	0,83	15,6	7,0	2,8	3,2	0,0277
160	11,0	RA160M4	110	1460	88,5	0,86	22	6,5	1,8	2,8	0,0613
160	15,0	RA160L4	129	1460	90,0	0,87	29	7,0	1,9	2,9	0,0862
180	18,5	RA180M4	149	1460	90,5	0,89	35	7,0	1,9	2,9	0,1038
180	22,0	RA180L4	157	1460	91,0	0,88	42	7,0	2,1	2,8	0,1131
200	30,0	RA200L4	210	1470	90,5	0,86	58	7,0	2,3	3,2	0,3100
225	37,0	RA225S4	230	1460	92,0	0,87	70	7,5	2,2	3,5	0,4000
225	45,0	RA225M4	260	1460	92,0	0,87	86	7,0	2,2	3,2	0,4500
250	55,0	RA250M4	325	1470	92,5	0,87	104	7,5	2,6	3,4	0,4400
280	75,0	RA280S4	455	1470	93,0	0,82	139	7,5	2,5	3,5	0,5000
280	90,0	RA280M4	500	1470	93,0	0,87	169	7,5	2,5	3,5	0,6000
315	110,0	RA315S4	740	1485	94,8	0,86	195	7,0	2,1	2,4	1,9600
315	132,0	RA315M4	840	1480	95,0	0,87	231	7,0	2,1	2,4	2,2700
<b>1000 об / мин (6 полюсов)</b>											
71	0,18	RA71A6	7,5	835	56,0	0,73	0,7	2,3	2,0	2,0	0,0006
71	0,25	RA71B6	7,5	860	58,0	0,73	0,9	3,0	2,0	2,0	0,0009
80	0,37	RA80A6	8,4	910	64,0	0,72	1,2	3,3	2,0	2,5	0,0027
80	0,55	RA80B6	10	915	67,0	0,70	1,8	3,3	2,0	2,5	0,0030
90	0,75	RA90S6	14	930	71,0	0,70	2,3	4,0	2,0	2,4	0,0040
90	1,1	RA90L6	16	930	72,0	0,72	3,2	4,0	2,0	2,4	0,0052
100	1,5	RA100L6	18	925	72,0	0,71	4,5	4,5	2,4	2,8	0,0163
112	2,2	RA112M6	33	960	79,0	0,75	5,6	5,0	1,8	2,3	0,0285
132	3,0	RA132S6	41	960	83,0	0,79	7	5,9	2,2	2,6	0,0352
132	4,0	RA132MA6	50	960	84,0	0,80	9	6,0	2,2	2,6	0,0368
132	5,5	RA132MB6	56	950	83,0	0,82	12,2	5,0	2,2	2,5	0,0434
160	7,5	RA160M6	110	970	87,0	0,80	16	6,0	2,0	2,8	0,0916
160	11,0	RA160L6	133	970	88,5	0,82	23	6,5	2,2	2,9	0,1232
180	15,0	RA180L6	155	970	89,0	0,82	31	7,0	2,3	3,0	0,1512
200	18,5	RA200LA6	190	970	87,0	0,82	39	5,5	1,8	2,7	0,3100
200	22,0	RA200LB6	195	970	87,0	0,84	46	6,0	2,0	2,5	0,3600
225	30,0	RA225M6	225	970	89,5	0,86	59	6,5	2,0	2,7	0,4430
250	37,0	RA250M6	360	970	91,0	0,89	66	6,0	2,0	2,3	0,8250
280	45,0	RA280S6	465	980	92,0	0,87	81	6,0	2,0	2,0	1,2800
280	45,0	RA280M6	520	980	92,5	0,88	97,5	6,0	2,1	2,2	1,4800
315	75,0	RA315S6	690	983	93,7	0,88	146	5,9	1,8	2,2	2,6300
315	90,0	RA315M6	800	983	94,2	0,88	174	5,9	1,8	2,2	3,3300

Продолжение таблицы 1.63

750 об / мин (8 полюсов)											
71	0,09	RA71A8	6,6	665	42,0	0,57	0,57	2,1	1,7	1,9	0,0005
71	0,12	RA71B8	8,1	660	45,0	0,58	0,7	2,3	1,6	2,0	0,0006
80	0,18	RA80A8	10,5	690	55,0	0,61	0,78	2,8	2,0	2,2	0,0013
80	0,25	RA80B8	12	695	56,0	0,59	1,12	3,0	2,3	2,5	0,0017
90	0,37	RA90S8	15	700	59,0	0,59	1,54	3,0	1,9	2,1	0,0030
90	0,55	RA90L8	18	675	63,0	0,62	2,04	3,2	2,1	2,2	0,0038
100	0,75	RA100LA8	23	705	67,0	0,60	2,7	3,3	2,0	2,3	0,0063
100	1,1	RA100LB8	28	705	72,0	0,68	3,25	4,0	2,0	2,4	0,0090
112	1,5	RA112M8	33,5	705	75,0	0,71	4,1	4,4	2,2	2,5	0,0225
132	2,2	RA132S8	46	705	75,0	0,75	5,6	4,0	1,7	2,3	0,0530
132	3,0	RA132M8	53	705	78,0	0,75	7,4	4,0	1,7	2,3	0,0625
160	4,0	RA160M8	107	700	84,0	0,71	10	4,8	1,8	2,2	0,1031
160	5,5	RA160MB8	112	730	84,0	0,71	14	4,8	1,8	2,2	0,1156
160	7,5	RA160L8	131	730	85,0	0,73	18	5,5	1,8	2,4	0,1443
180	11,0	RA180L8	158	730	87,0	0,75	26	5,5	1,8	2,4	0,1897
200	15,0	RA200L8	195	730	88,0	0,80	32	5,7	2,0	2,5	0,3600
225	18,5	RA225S8	265	725	88,0	0,80	38	5,0	2,0	2,2	0,4400
225	22,0	RA225M8	265	730	89,0	0,80	44,5	5,0	2,0	2,4	0,4400
250	30,0	RA250M8	360	730	90,0	0,80	60	5,5	2,2	2,2	0,8250
280	37,0	RA280S8	465	735	91,0	0,80	73,5	5,5	2,0	2,0	1,3500
280	45,0	RA280M8	520	735	91,5	0,77	92	5,5	2,2	2,0	1,5500
315	55,0	RA315S8	690	740	92,5	0,80	113	6,0	2,0	2,4	2,6300
315	75,0	RA3158	800	740	93,5	0,81	143	6,0	2,0	2,3	3,3300

Технические данные трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором типа А и АИР (привязка мощностей к установочно-присоединительным размерам по ГОСТ) приведены в таблице 1.64.

Таблица 1.64 – Технические данные АД с КЗР типа А и АИР

$h$ , мм	$P_2$ , кВт	Тип	$m$ , кг	$n_2$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos\phi$	$I_1$ , А	$\frac{I_n}{I_1}$	$\frac{M_n}{M_1}$	$\frac{M_m}{M_n}$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
3000 об / мин (2 полюса)											
71	0,75	A71A2	8,7	2820	74,0	0,83	1,9	5,3	2,5	2,7	0,0006
71	1,1	A71B2	10,5	2800	77,0	0,86	2,5	5,2	2,6	2,8	0,0008
80	1,5	A80A2	13	2835	79,0	0,87	3,2	6,5	2,8	3,0	0,0011
80	2,2	A80B2	15	2820	82,0	0,87	4,6	6,5	3,2	3,4	0,0018
90	3,0	A90L2	17	2835	82,0	0,86	6,5	6,5	2,9	3,2	0,0024
100	4,0	A100S2	20,5	2845	83,0	0,84	8,7	7,0	3,4	4,0	0,0070
100	5,5	A100L2	28	2860	84,0	0,86	11	5,5	1,8	2,2	0,0080

112	7,5	A112M2	49	2895	87,0	0,89	15	7,0	2,5	3,2	0,0185
<i>Продолжение таблицы 1.64</i>											
132	11,2	A132M2	54	2865	87,0	0,88	22	7,0	2,3	3,0	0,0227
160	15,0	AIP160S2	116	2940	88,0	0,86	30	7,5	2,0	3,2	0,0500
160	18,5	AIP160M2	130	2940	90,0	0,88	35	7,5	2,0	3,2	0,0550
180	22,0	A180S2	150	2940	90,5	0,89	42	7,5	2,1	3,5	0,0620
180	30,0	A180M2	170	2940	92,0	0,89	56	7,5	2,2	3,5	0,0700
200	37,0	A200M2	230	2940	91,5	0,88	70	7,5	2,3	3,2	0,1400
200	45,0	A200L2	255	2940	92,0	0,90	83	7,5	2,4	3,3	0,1600
225	55,0	A225M2	320	2950	93,5	0,90	100	7,5	2,3	4,0	0,2000
250	75,0	A225S2	450	2970	94,0	0,89	136	7,5	2,6	4,0	0,3500
250	90,0	A250M2	530	2970	94,0	0,90	162	7,5	2,7	4,0	0,4000
280	110	A280S2	650	2970	93,0	0,91	190	7,0	2,0	2,7	0,6000
280	132	A280M2	700	2970	93,0	0,91	230	7,0	2,0	2,7	0,7000
315	160	A131S2	1170	2965	95,8	0,92	328	7,0	2,6	2,7	2,8200
315	200	A315M2	1460	2973	96,1	0,93	404	7,3	2,1	2,0	3,6600
<b>1500 об / мин (4 полюса)</b>											
71	0,55	A71A4	8,4	1400	72,0	0,80	1,4	5,5	2,5	2,6	0,0010
71	0,75	A71B4	10	1400	75,0	0,75	2	5,5	2,3	2,8	0,0015
80	1,1	A80A4	14	1420	77,0	0,80	2,7	5,5	2,3	2,6	0,0028
80	1,5	A80B4	16	1420	78,5	0,80	3,6	5,5	2,3	2,8	0,0034
90	2,2	A90L4	17	1390	78,0	0,82	5,2	5,0	2,2	2,6	0,0056
100	3,0	A100S4	21	1395	78,0	0,80	7,3	5,5	2,7	3,0	0,0100
100	4,0	A100L4	37	1435	83,0	0,78	9	6,6	2,8	6,6	0,0130
112	5,5	A112M4	45	1450	87,0	0,85	11,3	7,0	2,4	3,0	0,0236
132	7,5	A132S4	52	1455	88,0	0,83	15,6	7,0	2,8	3,2	0,0227
132	11,0	A132M4	60	1435	87,0	0,88	22	7,0	2,5	2,9	0,0349
160	15,0	AIP160S4	125	1460	89,0	0,87	29	7,0	1,9	2,9	0,0600
160	18,5	AIP160M4	142	1460	90,0	0,89	35	7,0	1,9	2,9	0,0650
180	22,0	A180S4	160	1460	91,0	0,88	42	7,0	2,1	2,8	0,0700
180	30,0	A180M4	190	1460	91,0	0,89	56	7,0	2,4	3,0	0,0800
200	37,0	A200M4	230	1460	92,0	0,87	70	7,5	2,2	3,5	0,1500
200	45,0	A200L4	260	1460	92,0	0,87	86	7,0	2,2	3,2	0,1800
225	55,0	A225M4	325	1470	92,5	0,87	104	7,5	2,2	2,6	0,2000
250	75,0	A225S4	450	1470	93,0	0,82	139	7,5	2,5	3,5	0,3500
250	90,0	A250M4	495	1470	93,0	0,87	169	7,5	2,5	3,5	0,4000
280	110	A280S4	650	1470	93,0	0,91	190	7,0	2,0	2,7	0,6000
280	132	A280M4	700	1470	93,0	0,91	230	7,0	2,0	2,7	0,7000
315	160	A315S4	1000	1480	95,0	0,87	279	6,5	1,8	2,2	2,7000
315	200	A315M4	1200	1480	95,0	0,88	343	6,8	2,0	2,4	4,8200
<b>1000 об / мин (6 полюсов)</b>											
71	0,37	A71A6	8,4	910	64,0	0,72	1,2	4,0	2,0	2,2	0,0015
71	0,55	A71B6	10	915	67,0	0,70	1,8	4,0	2,0	2,2	0,0020



Продолжение таблицы 1.64

80	0,75	A80A6	14	930	71,0	0,70	2,3	4,0	2,0	2,4	0,0035
80	1,1	A80B6	16	930	72,0	0,72	3,2	4,0	2,0	2,4	0,0048
90	1,5	A90L6	18	925	72,0	0,71	4,5	4,5	2,4	2,8	0,0066
100	2,2	A100L6	33,5	950	78,0	0,76	5,4	5,3	2,2	2,7	0,0200
112	3,0	A100MA6	41	960	83,0	0,79	7	5,9	2,2	2,6	0,0380
112	4,0	A112MB6	50	960	84,0	0,80	9	6,0	2,2	2,6	0,0425
132	5,5	A132S6	56	950	83,0	0,82	12,2	5,0	2,2	2,5	0,0500
132	7,5	A132M6	61	960	84,5	0,77	17,5	6,5	2,8	3,1	0,0597
160	11,0	AIP160S6	125	970	87,0	0,82	23	6,5	2,2	2,9	0,0700
160	15,0	AIP160M6	155	970	89,0	0,82	31	7,0	2,3	3,0	0,0750
180	18,5	A180S6	160	970	89,0	0,86	37	6,0	2,2	3,0	0,0900
200	22,0	A200M6	195	970	87,0	0,84	46	6,0	2,0	2,5	0,2000
200	30,0	A200L6	225	970	89,5	0,86	59	6,5	2,0	2,7	0,2500
225	37,0	A225M6	360	973	91,0	0,89	66	6,0	2,0	2,3	0,8250
250	45,0	A225S6	465	980	92,0	0,87	81	6,0	2,0	2,0	1,2800
250	55,0	A250M6	520	980	92,5	0,88	97,5	6,0	2,1	2,2	1,4800
280	75,0	A280S6	690	985	93,5	0,87	133	6,5	2,0	2,4	2,6300
280	90,0	A280M6	800	990	94,0	0,88	157	6,5	2,0	2,4	3,3300
315	110	A315S6	880	985	94,0	0,88	202	7,0	2,3	2,6	3,6000
315	132	A315M6	1050	985	95,0	0,88	240	7,0	2,6	2,6	6,0000
<b>750 об / мин (8 полюсов)</b>											
71	0,25	A71B8	9	700	56,0	0,65	1,10	3,0	1,8	2,0	0,0025
80	0,37	A80A8	15	700	59,0	0,59	1,54	3,0	1,9	2,1	0,0030
80	0,55	A80B8	18	675	63,0	0,62	2,04	3,2	2,1	2,2	0,0038
90	0,75	A90LA8	23	705	67,0	0,60	2,70	3,3	2,0	2,3	0,0063
90	1,1	A90LB8	28	705	72,0	0,68	3,25	4,0	2,0	2,4	0,0090
100	1,5	A100L8	33,5	705	75,0	0,71	4,1	4,4	2,2	2,5	0,0123
112	2,2	A112MA8	46	705	75,0	0,75	5,6	4,0	1,7	2,3	0,0221
112	3,0	A112MB8	53	700	78,0	0,73	7,4	4,0	1,7	2,3	0,0288
132	4,0	A132S8	70	710	79,0	0,76	9,6	4,0	1,6	1,9	0,0690
132	5,5	A132M8	86	710	80,0	0,76	13	4,0	1,7	2,1	0,0935
160	7,5	AIP160S8	125	730	86,0	0,73	18	5,5	1,8	2,4	0,0800
160	11,0	AIP160M8	150	730	87,0	0,75	26	6,5	1,8	2,4	0,0850
180	15,0	A180M8	172	730	86,5	0,76	35	5,5	2,0	2,7	0,1000
200	18,5	A200M8	210	730	88,0	0,80	40	5,8	2,1	2,5	0,3000
200	22,0	A200L8	225	730	88,5	0,77	49	6,0	2,0	2,5	0,3500
225	30,0	A225M8	360	730	90,0	0,80	60	5,5	2,2	2,2	0,8250
250	37,0	A250S8	465	735	91,0	0,80	73,5	5,5	2,0	2,0	1,3500
250	45,0	A250M8	520	735	91,5	0,77	92,0	5,5	2,2	2,0	1,5500
280	55,0	A280S8	690	740	92,5	0,80	107	6,0	2,0	2,4	2,6300

Продолжение таблицы 1.64

280	75,0	A280M8	800	740	93,3	0,81	143	6,0	2,0	2,3	3,3300
315	90,0	A315S8	880	740	93,5	0,81	181	6,0	2,0	2,4	3,6000
315	110	A315M8	1050	740	94,5	0,81	218	6,0	2,4	2,6	6,0000
<b>500 об / мин (12 полюсов)</b>											
180	7,5	A180MA12	200	485	84,5	0,58	23,2	4,3	1,9	2,6	0,0900
180	9,0	A180MB12	210	480	82,0	0,64	26	3,7	1,8	2,0	0,0900
200	11,0	A200M12	215	480	83,0	0,61	33	4,0	2,0	2,5	0,2500
200	13,0	A200LA12	220	480	83,0	0,65	36,4	4,0	1,6	2,0	0,2500
200	15,0	A200LB12	250	480	84,0	0,61	39	4,5	2,0	3,0	0,2500
225	18,5	A225M12	325	480	84,0	0,69	48,5	4,?	1,7	2,5	0,8250
250	22,0	A250M12	460	480	85,0	0,71	55,4	5,0	1,7	2,6	1,4800

Технические данные трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором типа А, ЧАМ, АИР, многоскоростные (двух, трех и четырехскоростные); привязка мощностей к установочно-присоединительным размерам по ГОСТ приведены в таблице 1.65.

Таблица 1.65 – Технические данные АД с КЗР типа А, ЧАМ, АИР

$h$ , мм	$P_2$ , кВт	Тип	$m$ , кг	$n_2$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos\varphi$	$I_1$ , А	$\frac{I_{II}}{I_I}$	$\frac{M_{II}}{M_I}$	$\frac{M_{III}}{M_I}$
80	1,1 1,5	A80A4 / 2	14	50 60	72 69	0,80 0,85	2,9 3,9	4,5 4,5	1,8 1,8	2,2 2,2
90	1,5 2,0	A90LA4 / 2	16	50 60	74 71	0,85 0,89	3,6 4,8	5,0 5,0	1,8 1,6	2,3 2,1
90	2,0 2,65	A90LB4 / 2	22,2	50 60	74 77	0,82 0,85	2,9 3,9	5,0 5,0	2,4 2,3	2,6 2,8
90	0,63 1,0	A90L8 / 4	18	50 60	53 72	0,73 0,90	2,5 2,3	2,5 4,0	1,4 1,3	1,7 1,7
160	11,0 14,0	4AM160S 4 / 2	131	1460 2900	86,0 83,0	0,86 0,92	23 28	6,5 6,5	1,6 1,4	2,3 2,3
160	14,0 17,0	4AM160M 4 / 2	153	1460 2900	87,5 85,0	0,86 0,92	28 33	7,5 7,5	1,7 1,5	2,4 2,7
160	7,5 8,5	4AM160S 6 / 4	131	980 1455	84,0	0,82 0,91	17	6,5 5,5	1,8 1,3	2,5 2,2
160	11,0 13,0	4AM160M 6 / 4	156	980 1455	84,5 85,0	0,82 0,91	24 26	6,5 6,5	1,8 1,4	2,5 2,2
160	6,0 9,0	AИР160S 8 / 4	125	730 1460	81,0 84,0	0,69 0,88	16 18	5,5 7,0	1,8 1,5	2,0
160	9,0 13,0	AИР160M 6 / 4	150	730 1460	81,5 84,0	0,71 0,89	24 26	5,5 7,0	1,5 1,2	2,0
160	7,5 8,5	4AM160S 8 / 6	131	720 965	83,0 84,0	0,76 0,87	18	5,0	1,8 1,5	2,2
160	10,0 11,0	4AM160M 8 / 6	156	720 965	84,5 86,0	0,75 0,85	24 23	5,0 6,0	2,0 1,8	2,3

Продолжение таблицы 1.65

160	2,8 6,7	4AM160S 12 / 6	131	485 960	65,0 80,0	0,53 0,89	12 14	4,0 5,0	1,8 1,1	2,4 1,7
160	4,0 9,0	4AM160M 12 / 6	156	485 960	68,0 82,0	0,54 0,87	17 19	4,0 5,0	1,8 1,1	2,4 1,7
160	4,8 5,3 7,5	4AM160S6/ 4 / 2	131	970 1475 2925	79,5 81,0 77,5	0,81 0,82 0,93	11 12 16	5,5 7,0 7,0	1,3 1,3 1,1	2,0 2,2 2,2
160	6,7 7,5 10,5	4AM160M 6 / 4 / 2	153	970 1475 2925	81,5 83,0 79,0	0,78 0,84 0,93	16 16 23	6,0 7,0 7,0	1,3 1,3 1,1	2,0 2,2 2,2
160	3,4 4,25 6,3	4AM160S 8 / 4 / 2	131	720 1475 2925	75,0 81,5 77,5	0,74 0,81 0,93	10 10 13	4,5 7,5 7,0	1,2 1,2 1,0	1,8 2,5 2,5
160	5,0 7,1 9,5	4AM160M 8 / 4 / 2	153	720 1475 2925	78,5 84,0 81,0	0,72 0,85 0,94	13 15 19	5,0 7,0 7,0	1,3 1,1 1,0	2,0
160	4,0 4,5 7,5	4AM160S 8 / 6 / 4	131	735 980 1450	73,5 76,5 81,0	0,63 0,75 0,90	13 12 16	5,5 6,0 6,0	2,0 1,2 1,2	2,7 2,2 2,2
160	5,0 6,3 10,0	4AM160M 8 / 6 / 4	156	735 980 1450	74,5 78,5 82,5	0,64 0,78 0,91	16 16 20	5,0 6,5 6,0	2,0 1,2 1,2	2,7 2,2 2,2
160	1,8 4,0 4,25 6,7	4AM160M 12 / 8 / 6 / 4	156	490 730 970 1460	53,5 69,5 77,5 78,0	0,50 0,65 0,85 0,90	10 13 10 14	3,0 5,0 4,5 6,5	1,6 1,1 1,3 1,0	2,5 2,0 2,2 2,0

Технические данные трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с повышенным скольжением типа АС, АИС, АМС, АИРС на 1500, 1000 и 750 об/мин (привязка мощностей к установочно-присоединительным размерам по ГОСТ) приведены в таблице 1.66:

Таблица 1.66 – Технические данные АД с КЗР типа АС, АИС, АМС, АИРС

$h$ , мм	$P_2$ , кВт	Тип	$m$ , кг	$n_2$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos\varphi$	$I_1$ , А	$\frac{I_n}{I_1}$	$\frac{M_n}{M_1}$	$\frac{M_m}{M_1}$
<b>1500 об / мин (4 полюса)</b>										
80	1,3	АС80А4	14	1383	75	0,83	3,2	4,5	2,1	2,3
112	6,0	АС112М4	38	1388	81	0,82	14	5,0	2,5	2,6
132	8,5	АС13S4	52	1388	83	0,85	18	6,0	2,8	2,9
132	11,8	АИС132М4	61	1395	85	0,85	25	6,0	2,8	2,9
160	17,0	АИС160S4	130	1420	86	0,86	35	6,0	2,5	2,8
160	20,0	АС160М4	145	1420	87	0,87	40	6,5	2,9	3,2
<b>1000 об / мин (6 полюсов)</b>										
160	12,0	4АМС160S6	131	940	81,0	0,87	26	5,5	2,0	2,2
160	16,0	4АМС160М6	156	940	83,0	0,87	34	5,5	2,2	2,5
<b>750 об / мин (8 полюсов)</b>										
160	7,5	АИРС160S8	125	690	80,0	0,75	19	4,5	2,5	2,5



160	11,0	АИРС160М8	155	690	82,0	0,75	27	5,0	2,8	2,8
-----	------	-----------	-----	-----	------	------	----	-----	-----	-----

Технические данные трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором со встроенным тормозом типа АИР, ЧАМС и АИРС на 1500, 1000 и 750 об/мин (привязка мощностей к установочно-присоединительным размерам по ГОСТ) приведены в таблице 1.67.

**Таблица 1.67 – Технические данные АД с КЗР со встроенным тормозом типа АИР, ЧАМС и АИРС**

$h$ , мм	$P_2$ , кВт	Тип	$m$ , кг	$n_2$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos\varphi$	$I_1$ , А	$\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{H}}}$	$\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{H}}}$	$\frac{M_{\text{M}}}{M_{\text{H}}}$
<b>1500 об / мин (4 полюса)</b>										
160	15,0	АИР160S4E	125	1460	90,0	0,87	29	7,0	1,9	2,9
160	13,0	4АМС160S4E	170	1425	86,0	0,86	27	7,0	2,2	2,5
160	18,5	АИР160М4Е	142	1460	90,5	0,89	35	7,0	1,9	2,9
160	17,0	4АМС160М4Е	195	1430	87,0	0,87	34	7,0	2,2	2,5
<b>1000 об / мин (6 полюсов)</b>										
160	11,0	АИР160S6E	125	975	88,5	0,82	23	6,5	2,2	2,9
160	10,0	4АМС160S6E	170	940	82,5	0,85	22	5,5	2,2	2,5
160	15,0	АИР160М6Е	155	975	89,0	0,82	31	7,0	2,3	3,0
160	13,0	4АМС160М6Е	200	940	84,0	0,85	27	6,5	2,2	2,5
<b>750 об / мин (8 полюсов)</b>										
160	7,5	АИР160S8E	125	730	86,0	0,76	18	6,	1,6	2,5
160	7,0	АИРС160S8E	170	700	81,5	0,76	17	6,0	2,2	2,6
160	11,0	АИР160М8Е	150	730	87,0	0,76	26	6,0	1,6	2,5
160	10,0	АИРС160М8Е	200	700	82,5	0,75	23	6,0	2,2	2,6

Технические данные трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23 типа ЧАМН на 3000 и 1500 об / мин (привязка мощностей к установочно-присоединительным размерам по ГОСТ) приведены в таблице 1.68.

**Таблица 1.68 – Технические данные АД с КЗР со степенью защиты IP23 типа ЧАМН на 3000 и 1500 об / мин**

$h$ , мм	$P_2$ , кВт	Тип	$m$ , кг	$n_2$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos\varphi$	$I_1$ , А	$\frac{I_{\Pi}}{I_{\text{H}}}$	$\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{H}}}$	$\frac{M_{\text{M}}}{M_{\text{H}}}$
<b>3000 об / мин (2 полюса)</b>										
160	22,0	4АМН160S2	110	2910	88,0	0,87	44	7,0	1,6	2,4
160	30,0	4АМН160М2	130	2910	90,0	0,89	57	7,0	1,6	2,4
<b>1500 об / мин (4 полюса)</b>										
160	18,5	4АМН160S4	115	1460	88,0	0,87	36	6,5	1,6	2,1
160	22,0	4АМН160М4	135	1460	90,0	0,88	42	6,5	2,0	2,3

Технические данные трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором со степенью защиты IP44 типа ЧАК на 1500, 1000 и 750 об / мин (привязка мощностей к установочно-присоединительным размерам по ГОСТ) приведены в таблице 1.69.

*Таблица 1.69 – Технические данные АД с КЗР со степенью защиты IP44 типа ЧАК на 1500, 1000 и 750 об / мин*

$h$ , мм	$P_2$ , кВт	Тип	$m$ , кг	$n_2$ , об/мин	$\eta$ , %	$\cos\varphi$	$I_1$ , А	$U_2$ , А	$I_2$ , А	$\frac{M_m}{M_n}$
<b>1500 об / мин (4 полюса)</b>										
160	11,0	4AK160S4	170	1425	86,5	0,86	23	305	22	3,5
160	14,0	4AK160M4	185	1440	88,5	0,87	28	300	29	3,8
<b>1000 об / мин (6 полюса)</b>										
160	7,5	4AK160S6	170	950	82,5	0,77	18	300	18	3,5
160	10,0	4AK160M6	200	935	84,5	0,76	24	310	20	3,8
<b>750 об / мин (8 полюса)</b>										
160	5,5	4AK160S8	170	700	80,0	0,70	15	300	14	3,0
160	7,1	4AK160M8	200	705	82,0	0,70	19	290	16	3,0

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

## СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

Таблица А.1 – Провода марок ПЭТВ, ПЭТ-155, ПСД, ПСДК, ПСДТ, ПСДКТ

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм <sup>2</sup>	Диаметр (мм) изолированного провода марки				Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм <sup>2</sup>	Диаметр (мм) изолированного провода марки			
		ПЭТВ, ПЭТ-155	ПСД, ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ			ПЭТВ, ПЭТ-155	ПСД, ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ
0,06	0,00283	0,080	–	–	–	0,80	0,5030	0,865	1,07	1,02	0,98
0,07	0,00385	0,090	–	–	–	0,83	0,5410	0,895	1,10	1,05	1,01
0,08	0,00503	0,100	–	–	–	0,86	0,5810	0,925	1,13	1,08	1,04
0,09	0,00636	0,110	–	–	–	0,90	0,6360	0,965	1,17	1,12	1,08
0,10	0,00785	0,122	–	–	–	0,93	0,6790	0,995	1,20	1,15	1,11
0,11	0,00950	0,132	–	–	–	0,96	0,7240	1,025	1,23	1,18	1,14
0,12	0,01131	0,142	–	–	–	1,00	0,785	1,080	1,29	1,23	1,20
0,13	0,01327	0,152	–	–	–	1,04	0,849	1,120	1,33	1,27	1,24
0,14	0,01539	0,162	–	–	–	1,08	0,916	1,160	1,37	1,31	1,28
0,15	0,01767	0,180	–	–	–	1,12	0,985	1,200	1,41	1,35	1,32
0,16	0,0201	0,190	–	–	–	1,16	1,057	1,240	1,45	1,39	1,36
0,17	0,0227	0,200	–	–	–	1,20	1,131	1,280	1,49	1,43	1,40
0,18	0,0255	0,210	–	–	–	1,25	1,227	1,330	1,54	1,48	1,45
0,19	0,0284	0,220	–	–	–	1,30	1,327	1,385	1,59	1,53	1,50
0,20	0,0314	0,230	–	–	–	1,35	1,431	1,435	1,64	1,58	1,55
0,21	0,0346	0,240	–	–	–	1,40	1,539	1,485	1,69	1,63	1,60
0,23	0,0415	0,265	–	–	–	1,43	1,651	1,535	1,74	1,68	1,65
0,25	0,0191	0,285	–	–	–	1,50	1,767	1,586	1,79	1,73	1,70
0,27	0,0573	0,305	–	–	–	1,56	1,911	1,645	1,85	1,79	1,76
0,29	0,0661	0,325	–	–	–	1,62	2,060	1,705	1,91	1,87	1,66
0,31	0,0755	0,345	0,55	0,50	0,46	1,68	2,220	1,765	1,97	1,93	1,92
0,33	0,0855	0,365	0,57	0,52	0,48	1,74	2,380	1,825	2,03	1,99	1,98
0,35	0,0962	0,390	0,59	0,54	0,50	1,81	2,570	1,905	2,10	2,06	2,05
0,38	0,1134	0,420	0,62	0,57	0,53	1,88	2,780	1,975	2,17	2,13	2,12
0,41	0,1320	0,450	0,65	0,60	0,56	1,95	2,990	2,045	2,24	2,20	2,19
0,44	0,1521	0,480	0,68	0,63	0,59	2,02	3,200	2,115	2,32	2,28	2,27
0,47	0,1735	0,510	0,71	0,66	0,62	2,10	3,460	2,200	2,40	2,36	2,35

Продолжение таблицы А.1

0,49	0,1886	0,530	0,73	0,68	0,64	2,26	4,010	2,360	2,62	—	—
0,51	0,2040	0,565	0,77	0,71	0,68	2,44	4,680	2,540	2,80	—	—
0,53	0,2210	0,585	0,79	0,73	0,70	2,63	5,430	—	2,99	—	—
0,55	0,2380	0,605	0,81	0,75	0,72	2,83	6,290	—	3,19	—	—
0,57	0,2550	0,625	0,83	0,77	0,74	3,05	7,310	—	3,42	—	—
0,59	0,2730	0,645	0,85	0,79	0,76	3,28	8,450	—	3,65	—	—
0,62	0,3020	0,675	0,88	0,82	0,79	3,53	9,790	—	3,90	—	—
0,64	0,3220	0,700	0,90	0,64	0,81	3,80	11,34	—	4,17	—	—
0,67	0,3530	0,730	0,93	0,87	0,84	4,10	13,20	—	4,48	—	—
0,69	0,3740	0,750	0,95	0,89	0,86	4,50	15,90	—	4,88	—	—
0,72	0,4070	0,780	0,99	0,94	0,90	4,80	18,10	—	5,18	—	—
0,74	0,4300	0,805	1,01	0,96	0,92	5,20	21,23	—	5,58	—	—
0,77	0,4660	0,835	1,04	0,99	0,95	—	—	—	—	—	—
Провода марок ПЭТ-200											
Номиналь ый диаметр неизолирова нного провода, мм	Площадь поперечно го сечения неизолиро ванного провода, мм <sup>2</sup>	Диаметр изолированно го провода марки ПЭТ- 200	Номинальный диаметр неизолированно го провода, мм		Площадь поперечно го сечения неизолиро ванного провода, мм <sup>2</sup>	Диаметр изолированн ого провода марки ПЭТ-200					
0,50	0,196	0,552	1,25		1,227	1,325					
0,56	0,246	0,612	1,32		1,368	1,395					
0,63	0,312	0,690	1,40		1,539	1,485					
0,71	0,396	0,770	1,50		1,767	1,585					
0,75	0,442	0,810	1,60		2,011	1,685					
0,80	0,503	0,865	1,70		2,270	1,785					
0,85	0,567	0,915	1,80		2,545	1,895					
0,90	0,636	0,965	1,90		2,835	1,995					
0,95	0,709	1,015	2,00		3,142	2,095					
1,00	0,785	1,080	2,12		3,530	2,215					
1,06	0,882	1,135	2,24		3,941	2,345					
1,12	0,985	1,195	2,36		4,374	2,465					
1,18	1,094	1,255	2,50		4,909	2,605					

*Примечание* – Диаметры изолированных проводов вычислены с учетом расчетной средней двусторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемое как округленное среднеарифметическое из минимальной и максимальной толщины.

**Таблица А.2 – Размеры и площади поперечного сечения проволоки  
прямоугольной, лент и шин медных**

Номиналь- ный размер проволоки по большой стороне, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне (мм) для следующих расчетных площадей поперечного сечения проволоки, мм <sup>2</sup>										
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585
2,12	1,559	–	1,734	–	1,905	–	2,160	–	2,435	–	2,753
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,941
2,36	1,751	–	1,950	–	2,145	–	2,429	–	2,735	–	3,089
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285
2,65	1,983	–	2,211	–	2,436	–	2,753	–	3,098	–	3,495
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705
3,00	2,263	–	2,526	–	2,785	–	3,145	–	3,535	–	3,985
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195
3,26	2,543	–	2,841	–	3,135	–	3,537	–	3,973	–	4,475
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,765
3,75	2,863	–	3,201	–	3,535	–	3,985	–	4,473	–	5,035
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,026	4,265	4,505	4,785	6,065	5,385
4,25	3,263	–	3,651	–	4,035	–	4,545	–	5,098	–	5,735
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085
4,75	3,663	–	4,101	–	4,535	–	5,105	–	5,723	–	6,435
5,00	3,863	4,095	4,326	4,566	4,786	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785
5,30	4,103	–	4,596	–	5,088	–	5,721	–	6,410	–	7,205
5,60	4,343	4,505	4,866	5,126	5,385	5,721	6,067	6,393	6,785	7,177	7,625
6,00	4,663	–	5,226	–	5,785	–	6,505	–	7,286	–	8,185
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,10)	8,606
6,70	–	–	5,886	–	6,485	–	7,289	–	8,160	–	9,165
7,10	–	–	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725
7,50	–	–	–	–	7,285	–	8,185	–	9,160	–	10,29
8,00	–	–	–	–	7,785	9,265	8,745	9,255	9,785	10,35	10,99
8,50	–	–	–	–	–	–	9,305	–	10,41	–	11,69
9,00	–	–	–	–	–	–	9,865	10, 41	11,04	11,67	12,39
9,50	–	–	–	–	–	–	–	–	11,66	–	13,09
10,00	–	–	–	–	–	–	–	–	12,29	12,99	13,79
10,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	14,63
11,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	15,47

*Примечание* – Прямоугольную проволоку используют для изготовления изолированных проводов.

Продолжение таблицы А.2

Номинальный размер проволоки по большей стороне, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне (мм) для следующих расчетных площадей поперечного сечения проволоки, мм <sup>2</sup>											
	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80
2,24	3,145	3,369	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,36	—	3,561	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,50	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	4,025	—	4,407	—	—	—	—	—	—	—	—
2,80	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—	—	—	—	—	—
3,00	—	4,585	—	5,038	—	6,638	—	—	—	—	—	—
3,15	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	6,037	5,315	6,693	—	—	—	—
3,26	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—	7,141	—	—	—	—
3,55	5,110	6,465	5,672	5,027	6,382	6,737	7,163	7,589	7,829	8,326	—	—
3,75	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—	8,037	—	8,826	—	—
4,00	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117	8,597	8,891	9,451	10,65	10,85
4,25	—	6,584	—	7,287	—	8,137	—	9,157	—	10,08	—	11,35
4,50	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177	9,717	10,07	10,70	11,38	12,05
4,75	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—	10,28	—	11,33	—	12,75
5,00	7,285	7,785	8,137	3,637	9,137	9,637	10,24	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45
5,30	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—	11,51	—	12,70	—	14,29
5,60	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13
6,00	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—	13,08	—	14,45	—	16,25
6,30	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09
6,70	—	10,51	—	11,70	—	13,04	—	14,65	—	16,20	—	18,21
7,10	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33
7,50	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—	16,44	—	18,20	—	20,45
8,00	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60	17,66	18,33	19,45	20,65	21,85
8,50	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—	18,68	—	20,70	—	23,25
9,00	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72	19,80	20,69	21,95	23,30	24,65
9,50	—	15,99	—	16,74	—	18,64	—	20,92	—	23,20	—	26,05
10,00	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84	22,04	23,05	24,45	25,95	27,45
10,6	—	18,75	—	18,72	—	20,84	—	23,38	—	25,95	—	29,13
11,2	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81
11,8	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—	26,07	—	28,96	—	32,49
12,5	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14	27,64	28,95	30,70	32,58	34,45

Продолжение таблицы А.2

Номиналь- ый размер проволоки по большей стороне, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне (мм) для следующих расчетных площадей поперечного сечения проволоки, мм <sup>2</sup>											
	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	2,30	5,60
4,50	12,95	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,00	14,45	15,20	16,20	17,20	—	—	—	—	—	—	—	—
5,30	—	16,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,60	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6,00	—	18,35	—	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,30	18,35	19,30	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,70	—	20,56	—	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,10	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,50	—	23,08	—	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8,00	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,50	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9,00	23,46	27,80	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	—	29,38	—	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10,00	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,6	—	32,84	—	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,50
11,2	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,8	—	36,62	—	41,34	—	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22
12,5	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14
Номинальный размер лент на большей стороне b, мм	Расчетные сечения лент (мм <sup>2</sup> ) при следующих номинальных размерах лент по меньшей стороне а, мм											
	1,25	1,35	1,45	1,50	1,56	1,68	1,85	1,95	2,00			
11,6	14,2	—	—	—	—	—	—	—	—			
12,5	15,3	16,5	—	—	—	—	—	—	—			
13,5	16,5	17,8	19,1	—	—	—	—	—	—			
14,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
14,5	17,9	19,2	20,6	—	22,1	—	—	—	—			
15,6	19,2	20,7	22,2	—	23,8	25,6	—	—	—			
16,0	—	—	—	23,5	—	—	—	—	—			
16,8	20,7	22,3	23,9	—	25,7	27,6	29,7	—	—			
18,0	22,2	23,9	25,7	—	27,6	29,6	31,9	34,3	—			
19,5	24,0	25,9	27,9	—	29,9	32,2	34,6	37,2	—			
20,0	—	—	—	29,5	—	—	—	—	—	39,1		
22,0	27,2	29,3	31,5	—	33,8	36,4	39,1	42,1	—			
25,0	30,9	33,4	35,8	37,0	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1			
26,3	32,5	35,1	37,7	—	40,5	43,6	46,9	50,5	—			

Продолжение таблицы А.2

28,0	34,7	37,4	40,2	—	43,2	46,4	50,0	53,8	—
30,0	37,2	40,1	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1
32,0	39,7	42,8	46,0	—	49,4	53,2	57,2	61,6	—
35,0	43,4	46,9	50,3	—	54,1	58,2	62,7	67,4	—
40,0	49,7	53,6	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1
45,0	55,9	60,4	64,8	—	69,7	75,0	80,8	86,9	—
47,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50,0	62,2	67,1	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1
55,0	—	—	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	—
60,0	74,7	80,6	86,6	—	93,1	100,2	107,9	116,2	—
65,0	—	—	—	—	100,9	—	—	125,9	—
70,0	—	—	—	—	108,7	—	—	135,7	—
80,0	—	—	—	—	124,3	—	—	155,2	—
90,0	—	—	—	—	139,9	—	—	174,7	—
100,0	—	—	—	—	155,5	—	—	194,2	—
Номинальный размер лент на большой стороне b, мм	Расчетные сечения лент (мм <sup>2</sup> ) при следующих номинальных размерах лент по меньшей стороне а, мм								
	2,10	2,26	2,44	2,50	2,63	2,83	3,00	3,28	3,53
19,5	40,6	48,6	—	—	—	—	—	—	—
20,0	—	55,4	—	—	—	—	—	—	—
22,0	45,3	58,3	52,4	—	—	—	—	—	—
25,0	51,6	62,2	59,7	61,2	64,3	—	—	—	—
26,3	54,3	66,7	62,8	—	67,7	72,7	—	—	—
28,0	57,9	71,3	67,0	—	72,2	77,5	82,1	—	—
30,0	62,1	78,0	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	96,1	—
32,0	66,3	89,3	76,8	—	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
35,0	72,6	100,6	84,1	—	90,6	97,4	103,1	112,5	120,9
40,0	83,1	—	96,3	98,7	103,7	111,5	118,1	128,9	138,5
45,0	93,6	111,9	108,5	—	110,9	125,7	133,1	145,3	156,2
47,0	—	123,2	114,4	—	122,1	—	—	—	—
50,0	104,1	134,5	120,7	123,7	130,0	139,8	148,1	161,7	173,8
55,0	114,6	48,6	132,9	—	143,2	154,0	163,1	178,1	191,5
60,0	125,1	55,4	145,1	—	155,3	168,1	178,1	194,5	209,1
65,0	—	—	157,3	—	169,5	182,3	193,1	210,8	226,8
70,0	—	—	169,5	—	—	—	208,1	227,3	244,4
80,0	—	—	193,9	—	—	—	238,1	—	—
90,0	—	—	218,3	—	—	—	268,1	—	—
100,0	—	—	242,7	—	—	—	298,1	—	—



Продолжение таблицы А.2

Номинальный размер шин по большей стороне b, мм	Расчетные сечения шин (мм <sup>2</sup> ) при следующих номинальных размерах шин по меньшей стороне a, мм									
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	8,0	9,0	10,0
20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	198,1
25	–	–	–	–	–	–	–	198,1	223,1	248,1
30	–	–	–	–	179,1	193,1	208,1	238,1	268,1	298,1
32	–	–	–	–	191,1	206,1	–	–	–	–
35	–	–	174,1	191,6	209,1	225,6	–	278,1	–	348,1
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	258,1	278,1	318,1	358,1	398,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	290,6	313,1	358,1	403,1	448,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	323,1	348,1	398,1	448,1	498,1
55	219,5	246,6	274,1	301,6	329,1	355,6	383,1	438,1	493,1	548,1
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	388,1	418,1	478,1	538,1	598,1
65	259,5	291,6	324,1	–	389,1	–	453,1	–	583,1	648,1
70	279,5	314,1	349,1	–	–	–	–	558,1	628,1	698,1
75	–	–	–	–	–	–	–	598,1	–	–
80	319,5	359,1	399,1	–	479,1	–	558,1	638,1	–	798,1
90	359,5	404,1	449,1	–	539,1	–	628,1	718,1	–	898,1
100	399,5	449,1	499,1	–	599,1	–	698,1	798,1	–	998,1
120	–	–	–	–	–	–	–	958,1	–	1198,1

Таблица А.3 – Двусторонняя толщина изоляции обмоточных проводов прямоугольного поперечного сечения

Марка провода	Номинальные размеры проводов по меньшей стороне, мм				Номинальные размеры проводов по большей стороне, мм					
	от 0,90 до 2,00	от 2,10 до 3,80	от 4,0 до 5,6	от 2,10 до 2,50	от 2,63 до 3,35	от 3,53 до 4,50	от 4,70 до 5,60	от 5,90 до 7,10	от 7,40 до 8,00	от 8,50 до 12,50
ПСДКТ	0,22	0,22	–	0,26	0,28	0,28	0,30	0,30	0,32	0,32
ПСДК и ПСД	0,27	0,33	0,4	0,32	0,36	0,39	0,42	0,44	0,46	0,48
Примечание – Двусторонняя толщина изоляции проводов марок ПЭТВП, ПЭТП-155 и ПЭТП-200-0,15 мм.										

**Таблица А.4 – Размеры и площади поперечного сечения прямоугольных (прессованных) шин из алюминия**

Номинальный размер шины по меньшей стороне, мм	Площадь поперечного сечения шины (мм <sup>2</sup> ) при номинальном размере по большей стороне, мм			
	30	40	50	60
4	120 180	160 240	200 300	240 360
5	150	200	250	300
6	180	240	300	360
Примечание – Алюминий марки АД0 с удельным сопротивлением не более 0,029 Ом·мм <sup>2</sup> /м при 20°С, плотность материала 2,71 г/см <sup>3</sup> .				

**Таблица А.5 – Основная таблица намагничивания. Сталь 2013**

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,07	0,08	0,09
	Н, А/см									
0,5	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69
0,6	0,70	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,74	0,75	0,76	0,77
0,7	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87
0,8	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
0,9	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
1,0	1,0	1,11	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23
1,1	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,32	1,33	1,34	1,36	1,38
1,2	1,41	1,46	1,52	1,58	1,64	1,70	1,76	1,82	1,88	1,94
1,3	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,9
1,4	3,00	3,20	3,50	3,80	4,10	4,30	4,60	5,00	5,40	5,8
1,5	6,20	6,70	7,80	8,90	10,0	11,3	12,4	13,5	14,6	15,8
1,6	17,0	18,6	20,2	21,8	23,4	25,0	27,0	28,0	30,0	32,0
1,7	34,0	37,0	40,0	43,0	47,0	50,0	54,0	58,0	62,0	66,0
1,8	70,0	75,0	80,0	85,0	92,0	100	106	112	118	124
1,9	130	136	142	148	156	165	173	181	189	198
2,0	207	226	244	263	281	300	360	420	480	540
2,1	600	670	740	810	880	950	1020	1090	1160	1230
2,2	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780	1860	1940	2020
2,3	2100	2180	2260	2340	2420	2500	2580	2660	2740	2820
2,4	2900	2980	3060	3140	3220	3300	3380	3460	3540	3620

Таблица А.6 – Основная таблица намагничивания. Сталь 2312

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,73	0,74	0,75	0,75
0,5	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85
0,6	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95
0,7	0,96	0,99	1,03	1,08	1,13	1,18	1,22	1,26	1,31	1,35
0,8	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70	1,75	1,80	1,85
0,9	1,90	1,95	2,00	2,05	2,10	2,15	2,20	2,25	2,30	2,35
1,0	2,40	2,46	2,52	2,58	2,64	2,70	2,76	2,82	2,88	2,94
1,1	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90
1,2	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,60	4,70	4,80	5,00	5,20
1,3	5,50	5,80	6,10	6,50	6,90	7,30	7,80	8,30	8,80	9,40
1,4	10,0	10,6	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	14,2	14,8	15,4
1,5	16,0	17,5	19,0	20,5	22,0	23,5	25,0	27,0	29,0	31,0
1,6	34,0	36,0	38,0	41,0	44,0	47,0	53,0	59,0	65,0	71,0
1,7	77,0	82,0	89,0	94,0	100	106	111	117	122	128
1,8	134	140	146	152	158	164	170	176	182	188
1,9	194	200	218	237	257	278	300	322	344	366
2,0	388	410	434	460	480	521	557	597	641	689
2,1	740	800	860	920	980	1050	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3040	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760

Таблица А.7 – Основная таблица намагничивания. Сталь 2411

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
0,5	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89
0,6	0,90	0,92	0,94	0,96	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07
0,7	1,09	1,11	1,13	1,15	1,17	1,19	1,22	1,24	1,27	1,30
0,8	1,33	1,35	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1,54	1,58	1,62
0,9	1,66	1,70	1,74	1,79	1,84	1,87	1,94	1,99	2,05	2,11
1,0	2,17	2,23	2,30	2,37	2,44	2,52	2,60	2,69	2,77	2,86
1,1	2,95	3,04	3,14	3,24	3,34	3,44	3,55	3,66	3,77	3,88
1,2	3,99	4,11	4,23	4,35	4,47	4,60	4,73	4,86	5,00	5,40
1,3	5,85	6,30	6,80	7,35	7,95	8,60	9,30	10,0	10,7	11,5
1,4	12,3	13,2	14,2	15,2	16,3	17,5	18,7	20,1	21,6	23,2
1,5	25,0	26,8	28,7	30,8	33,0	35,4	38,0	40,9	43,8	47,0
1,6	50,0	53,8	57,6	62,0	66,5	71,2	76,5	82,0	88,0	94,0
1,7	100	105	110	115	120	125	131	137	143	149
1,8	156	162	168	175	183	191	200	209	219	229
1,9	239	250	262	274	287	300	320	360	420	500
2,0	590	680	770	860	950	1040	1130	1220	1310	1400
2,1	1490	1580	1670	1760	1850	1940	2030	2120	2210	2300
2,2	2390	2480	2570	2660	2750	2840	2930	3020	3110	3200
2,3	3290	3380	3470	3560	3650	3740	3830	3920	4010	4100
2,4	4190	4280	4370	4460	4550	4640	4730	4820	4910	5000

*Таблица А.8 – Таблица намагничивания для зубцов машин переменного тока. Сталь 2013*

В, Т л	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	1,24	1,27	1,3	1,33	1,36	1,38	1,41	1,44	1,47	1,5
0,5	1,54	1,57	1,6	1,64	1,67	1,71	1,74	1,77	1,8	1,84
0,6	1,88	1,91	1,94	1,98	2,01	2,05	2,08	2,12	2,16	2,24
0,7	2,23	2,26	2,29	2,33	2,36	2,4	2,43	2,47	2,50	2,53
0,8	3,56	2,59	2,62	2,65	2,68	2,71	2,74	2,77	2,80	2,83
0,9	2,86	2,90	2,93	2,97	3,01	3,04	3,08	3,12	3,16	3,20
1,0	3,24	3,29	3,33	3,38	3,42	3,46	3,50	3,55	3,60	3,65
1,1	3,70	3,75	3,80	3,85	3,91	3,96	4,01	4,06	4,11	4,17
1,2	4,24	4,30	4,35	4,42	4,48	4,55	4,61	4,67	4,73	4,79
1,3	4,86	4,95	5,04	5,14	5,24	5,33	5,63	5,74	5,84	5,95
1,4	5,86	5,98	6,10	6,22	6,34	6,46	6,58	6,70	6,83	6,96
1,5	7,09	7,22	7,35	7,49	7,63	7,77	7,91	8,05	8,20	8,35
1,6	8,5	8,78	9,06	9,34	9,62	9,90	10,2	10,5	10,8	11,1
1,7	11,5	11,8	12,2	12,5	12,9	13,3	13,6	14,0	14,4	14,8
1,8	15,2	15,7	16,2	16,7	17,2	17,7	18,3	18,9	19,5	20,1
1,9	20,7	21,6	22,5	23,4	24,3	25,2	26,4	27,6	28,9	30,2
2,0	31,5	33,2	35,0	36,8	38,6	40,4	42,6	44,8	47,0	49,2
2,1	51,4	54,4	57,4	60,5	63,6	66,7	71,2	75,7	80,2	84,7
2,2	89,2	94,3	99,4	104,6	109,8	115	120	126	132	138
2,2	144	151	158	165	172	180	188	196	205	214

*Таблица А.9 – Таблица намагничивания для зубцов машин переменного тока. Сталь 2312*

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,71
0,5	1,74	1,77	1,80	1,84	1,86	1,90	1,92	1,96	1,98	2,02
0,6	2,04	2,09	2,13	2,16	2,21	2,24	2,29	2,33	2,37	2,41
0,7	2,45	2,49	2,53	2,57	2,62	2,67	2,72	2,77	2,82	2,87
0,8	2,92	2,97	3,02	3,06	3,11	3,16	3,22	3,26	3,31	3,37
0,9	3,42	3,47	3,53	3,60	3,66	3,72	3,79	3,84	3,90	3,96
1,0	4,03	4,09	4,17	4,25	4,33	4,40	4,50	4,60	4,70	4,77
1,1	4,88	4,97	5,09	5,17	5,27	5,37	5,47	5,59	5,70	5,82
1,2	5,93	6,02	6,13	6,26	6,38	6,51	6,63	6,77	6,95	7,10
1,3	7,24	7,38	7,55	7,70	7,90	8,04	8,20	8,40	8,57	8,79
1,4	8,97	9,17	9,36	9,55	9,77	10,0	10,2	10,4	10,6	10,9
1,5	11,2	11,5	11,7	12,1	12,4	12,7	13,1	13,3	13,7	14,1
1,6	14,5	14,9	15,3	15,6	16,1	16,5	16,9	17,5	17,9	18,4
1,7	19,0	19,4	20,0	20,7	21,4	22,2	23,0	23,8	25,0	26,0
1,8	27,0	28,0	29,2	30,5	32,2	33,3	34,9	36,1	37,1	40,0
1,9	41,6	43,6	46,0	48,0	50,3	53,3	54,3	57,9	61,3	64,2
2,0	67,5	71,7	74,0	77,9	81,5	85,2	90,0	94,0	97,5	102
2,1	106	110	115	121	126	130	135	141	147	154
2,2	159	165	173	178	185	191	196	203	211	220
2,3	231	243	255	268	281	295	309	324	339	364

*Таблица А.10 – Таблица намагничивания для зубцов машин переменного тока. Сталь 2411*

B, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,72	0,73	0,74	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82
0,5	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92
0,6	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02	1,04
0,7	1,05	1,06	1,08	1,10	1,11	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20
0,8	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40
0,9	1,42	1,44	1,47	1,49	1,51	1,55	1,8	1,60	1,63	1,65
1,0	1,68	1,71	1,75	1,77	1,80	1,84	1,88	1,91	1,96	2,00
1,1	2,04	2,07	2,12	2,16	2,22	2,27	2,32	2,37	2,42	2,47
1,2	2,54	2,59	2,65	2,72	2,77	2,84	2,91	2,98	3,07	3,16
1,3	3,23	3,33	3,41	3,51	3,61	3,72	3,83	3,94	4,04	4,21
1,4	4,25	4,32	4,61	4,80	4,97	5,18	5,37	5,54	5,73	5,96
1,5	6,22	6,44	6,73	7,00	7,28	7,56	7,95	8,28	8,59	8,90
1,6	9,32	9,76	10,2	10,7	11,3	11,8	12,6	13,5	14,4	15,2
1,7	16,3	17,4	18,7	20,2	21,3	23,0	24,5	26,3	28,3	30,4
1,8	31,9	34,1	35,9	38,3	41,0	44,0	46,0	48,0	51,0	54,0
1,9	57,0	59,0	63,0	66,0	69,0	72,0	77,0	81,0	83,0	87,0
2,0	92,0	97,0	100	105	109	114	120	127	131	137
2,1	142	150	158	165	172	179	187	198	206	216
2,2	226	237	246	261	269	287	300	314	332	354
2,3	376	399	422	446	470	495	520	546	572	598

**Таблица А.11 – Таблица намагничивания для спинки машин переменного тока. Сталь 2013**

$B$ , Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H$ , А/см									
0,4	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62
0,5	0,64	0,65	0,66	0,67	0,69	0,71	0,72	0,74	0,76	0,78
0,6	0,80	0,81	0,83	0,85	0,87	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97
0,7	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,11	1,13	1,15	1,18	1,21
0,8	1,24	1,26	1,29	1,32	1,35	1,38	1,40	1,43	1,46	1,47
0,9	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,68	1,71	1,74	1,77	1,81
1,0	1,85	1,88	1,91	1,95	1,99	2,03	2,06	2,09	2,13	2,17
1,1	2,21	2,25	2,29	2,33	2,37	2,41	2,45	2,49	2,53	2,57
1,2	2,62	2,67	2,72	2,77	2,83	2,89	2,95	3,01	3,07	3,13
1,3	3,20	3,27	3,34	3,41	3,49	3,57	3,65	3,73	3,82	3,91
1,4	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,50	4,64	4,78	4,92	5,06
1,5	5,20	5,42	5,64	5,86	6,08	6,30	6,54	6,78	7,02	7,26
1,6	7,50	7,88	8,26	8,64	9,02	9,40	9,82	10,2	10,7	11,1
1,7	11,5	12,2	12,9	13,6	14,3	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0
1,8	20,0	21,6	23,2	24,9	26,5	28,1	29,6	31,1	32,7	34,2
1,9	35,7	38,0	40,3	42,6	44,9	47,2	49,3	51,4	53,5	55,6
2,0	57,7	60,0	63,0	66,0	70,0	74,0	79,0	84,0	90,0	97,0



*Таблица А.12 – Таблица намагничивания для спинки машин переменного тока. Сталь 2312*

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, A/см									
0,4	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06
0,5	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18	1,20	1,22	1,24	1,26	1,28
0,6	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,47	1,50	1,53	1,56
0,7	1,59	1,62	1,66	1,69	1,72	1,76	1,80	1,83	1,86	1,90
0,8	1,94	1,98	2,01	2,04	2,08	2,12	2,16	2,20	2,23	2,27
0,9	2,31	2,35	2,39	2,43	2,48	2,52	2,55	2,60	2,65	2,69
1,0	2,74	2,79	2,84	2,89	2,95	3,00	3,05	3,11	3,18	3,23
1,1	3,32	3,38	3,44	3,51	3,57	3,67	3,74	3,82	3,90	3,98
1,2	4,10	4,18	4,26	4,35	4,44	4,55	4,66	4,75	4,87	4,98
1,3	5,09	5,21	5,33	5,46	5,58	5,72	5,85	6,00	6,18	6,35
1,4	6,56	6,75	6,95	7,17	7,40	7,63	7,89	8,15	8,43	8,70
1,5	9,05	9,34	9,65	10,0	10,4	10,9	11,3	11,9	12,4	12,9
1,6	13,7	14,4	15,2	15,9	16,6	17,2	18,2	19,1	20,1	21,1
1,7	21,8	23,1	24,1	25,5	26,1	27,2	28,4	29,8	31,3	32,9
1,8	34,6	36,3	38,0	39,7	41,4	43,1	44,9	46,7	48,5	50,4
1,9	52,2	56,0	60,0	64,0	69,0	74,0	79,0	85,0	91,0	97,0
2,0	104	11	118	125	133	141	149	158	167	176

*Таблица А.13 – Таблица намагничивания для спинки машин переменного тока. Сталь 2411*

В, Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/см									
0,4	0,48	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,53	0,54
0,5	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,61	0,61	0,61	0,62
0,6	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,69	0,70	0,71
0,7	0,72	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,78	0,79
0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,87	0,88	0,90	0,92	0,94
0,9	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,05	1,07	1,09	1,12	1,14
1,0	1,16	1,18	1,21	1,24	1,26	1,29	1,32	1,36	1,39	1,43
1,1	1,46	1,50	1,54	1,58	1,62	1,67	1,72	1,76	1,82	1,88
1,2	1,92	1,98	2,04	2,10	2,16	2,22	2,30	2,38	2,46	2,60
1,3	2,72	2,88	3,00	3,16	3,30	3,40	3,58	3,70	3,86	3,99
1,4	4,10	4,40	4,60	4,90	5,30	5,70	6,10	6,60	7,10	7,70
1,5	8,20	8,90	9,60	10,3	11,0	11,7	12,3	13,1	14,0	14,8
1,6	15,6	16,4	17,3	18,2	19,2	20,0	21,0	22,6	24,4	26,0
1,7	28,0	29,6	31,0	32,6	34,0	35,8	37,4	39,0	41,0	43,0
1,8	45,0	47,0	50,0	53,0	55,0	58,0	61,0	64,0	68,0	72,0
1,9	76,0	80,0	85,0	91,0	97,0	103	111	119	131	142
2,0	160	180	200	220	238	255	276	296	315	338

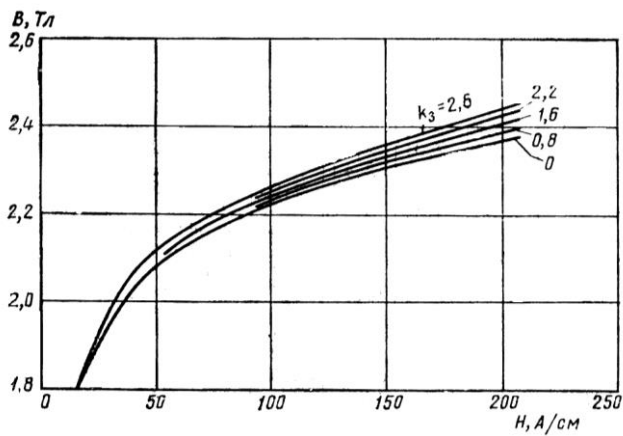


Рисунок А.1 – Кривые намагничивания для зубцов машин переменного тока для стали 2013

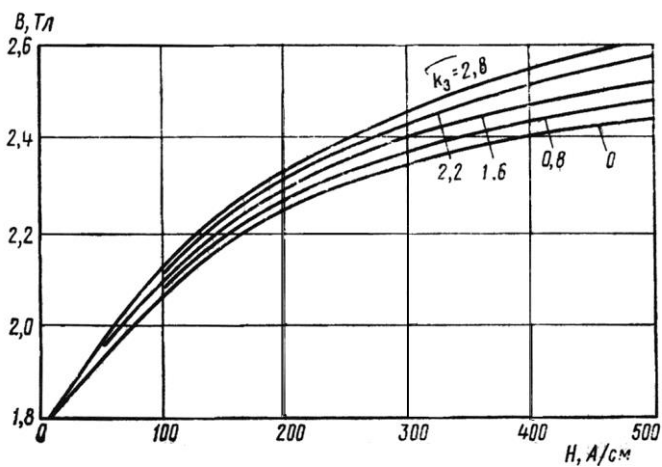


Рисунок А.2 – Кривые намагничивания для зубцов машин переменного тока для стали 2312

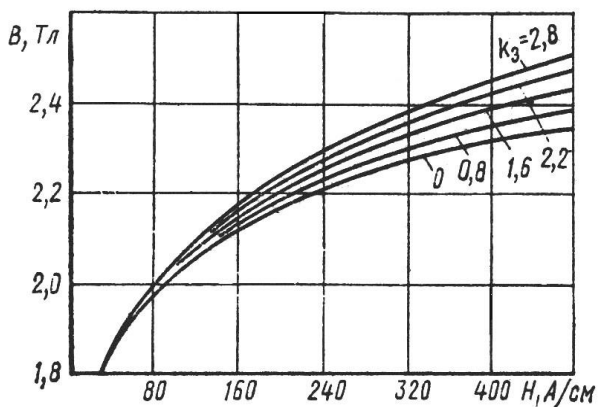
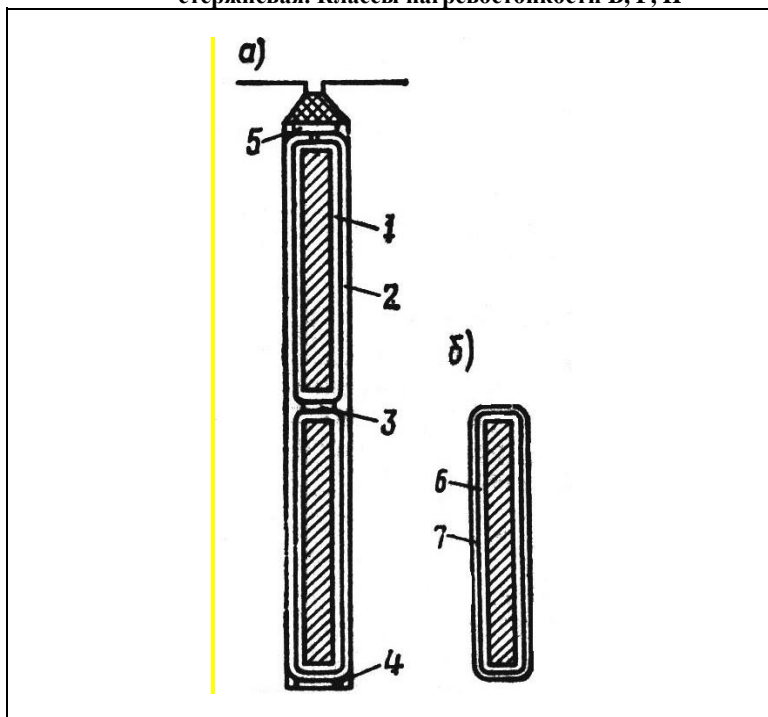


Рисунок А.3 – Кривые намагничивания для зубцов машин переменного тока для стали 2411

Таблица А.14 – Изоляция обмотки фазного ротора АД. Пазы прямоугольные полузакрытые. Обмотка двухслойная, стержневая. Классы нагревостойкости В, F, H



Продолжение таблицы А.14

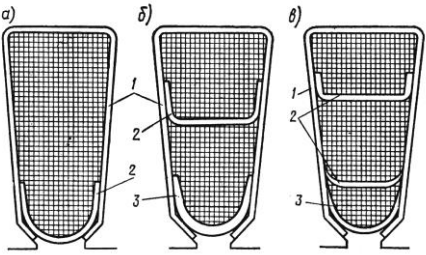
Часть обмотки	Позиция	Материал		Количество слоев при		Толщина изоляции (мм)			
						750 В		более 750 В	
		наименование	толщина, мм	750 В	более 750 В	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая (а)	1	Синтофоль	0,16	3,5	7,5	1,1	2,2	2,4	4,8
	2	Стеклолакот кань	0,15	1,0	1,0	0,3	0,3	0,3	0,3
	3	Стеклотекстолит	0,50	1,0	1,0	–	0,5	–	0,5
	4	«	0,50	1,0	1,0	–	0,5	–	0,5
	5	«	0,50	1,0	1,0	–	0,5	–	0,5
	–	Допуск на укладку обмотки				0,3	0,5	0,3	0,5
	–	Общая толщина изоляции в пазу				1,7	4,5	3,0	7,1
Лобовая (б)	6	Лента стекло слюдинитовая	0,15	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста	0,6	0,6	1,2	1,2
	7	Лента стеклянная	0,10	1 вполнахлеста	2 вполнахлеста	0,4	0,4	0,8	0,8
	–	Общая толщина изоляции стержня				1,0	1,0	2,0	2,0

Таблица А.15 – Марки изоляционных материалов

Наименование материала	Марка при классах		
	В	Ф	Н
Синтофоллий	Синтофоллий F		Синтофоллий Н
Стеклолакоткань	ЛСП	ЛСП	ЛСП
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
Лента стеклослюдинитовая	ЛС ПЭ934–ТП	ЛС ПЭ934–ТП	–
Пленка полиамидная	–	–	ПМ
Лента стеклянная	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС

*Примечание* – При классе нагревостойкости Н вместо ленты стеклослюдинитовой (позиция б) применяют пленку полиамидную марки ПМ толщиной 0,05 мм.

Таблица А.16 – Изоляция обмотки статора машин переменного тока. Напряжение до 690 В. Пазы трапецидальные полузакрытые. Обмотка однослойная и двухслойная, выпянная. Провод круглый. Классы нагревостойкости изоляции В, F, H

					
Обмотка	Высота оси вращения, мм	Позиция	Толщина пленкостеклопласта, мм	Количество слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
Однослойная (а)	50–80	1	0,20	1	0,20
		2	0,30	1	0,30
	90–132	1	0,25	1	0,25
		2	0,35	1	0,35
	160	1	0,40	1	0,40
		2	0,50	1	0,50

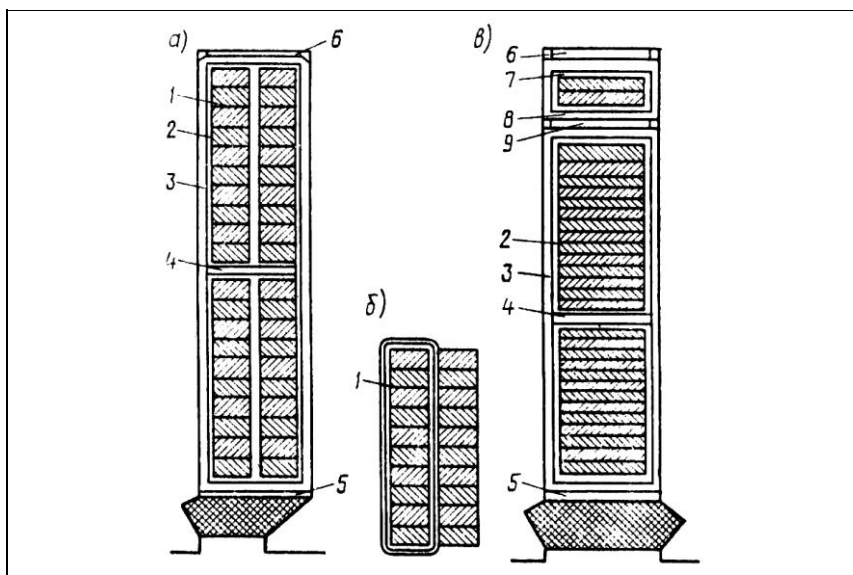
Продолжение таблицы А.16

Двухслойная (б)	180–280	1	0,40	1	0,40
		2	0,40	1	0,40
		3	0,50	1	0,50
Двухслойная (в)*	180–280	1	0,40	1	0,40
		2	0,40	1	0,40
		3	0,50	1	0,50

*Примечание* – Марка пленкостеклопласта – «Изофлекс» при классах В и «Имидофлекс» – при классах F и H. Прокладку в лобовых частях обмотки выполняют из материала, указанного в позиции 1.

Таблица А.17 – Изоляция обмотки статора машин переменного тока.

**Напряжение до 690 В. Пазы прямоугольные полуоткрытые и открытые. Обмотка двухслойная, с жесткими полукатушками. Провод прямоугольный. Классы нагревостойкости изоляции В, F, H. Изоляция обмотки статора машин переменного тока. На**



Продолжение таблицы А.17

Часть обмотки	Позиция	Материал		Количество слоев	Толщина изоляции, мм для пазов			
		наименование	толщина, мм		а		в	
					по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая (а и в)	1	Обволакивающее покрытие	0,05	1,0	0,2	0,2	0,2	
	2	Бумага фенилоновая лакированная	0,09	1,5	0,6	0,6	0,6	0,6
	3	Лакотканеслюдопласт	0,55	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
	4	Стеклотекстолит	1,00	1,0	–	1,0	–	1,0
	5	То же	0,50	1,0	–	0,5	–	0,5
	6	«	0,50	1,0	–	0,5	–	0,5
	7	Бумага фенилоновая лакированная	0,09	1,5	–	–	0,6	0,6
	8	Лакотканеслюдопласт	0,55	1,0	–	–	1,1	1,1
		Стеклотекстолит	0,50	1,0	–	–	–	0,5
	–	Допуск на укладку обмотки			0,3	0,6	0,3	0,6
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой)			2,2	4,5	2,2	6,5
	–	Скрепляющий бандаж из ленты стеклянной 0,12 в двух местах	0,10	2,5	0,5	0,5	–	–
Лобовая (б)	10	Обволакивающее покрытие	0,05	1,0	0,1	0,1	–	–
	–	Общая толщина изоляции полукатушки	–	–	0,6	0,6	–	–

*Примечание* – Обозначения: а –пазовая часть обмотки асинхронного двигателя при прямоугольных полуоткрытых пазах; б – лобовая часть обмотки асинхронного двигателя при прямоугольных полуоткрытых пазах; в – пазовая часть обмотки при прямоугольных открытых пазах и наличии однослойной дополнительной обмотки.



Таблица А.18 – Марки изоляционных материалов

Наименование материала	Марка при классах		
	В	Ф	Н
Лакотканеслюдопласт	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСП	–
Микалента	–	–	ЛФК-ТТ

*Примечание* – Крайние полукатушки фаз имеют дополнительную изоляцию на стеклолакоткани при классах В и F; микаленты или ленты стеклянной – при классе Н.

Таблица А.19 – Изоляция обмотки статора асинхронного двигателя.

**Напряжение до 660 В. 2р=10 и 12. Пазы трапецидальные полужакрытые. Обмотка двухслойная, выпная. Провод круглый эмалированный.Классы нагревостойкости изоляции В, F, Н**

Позиция	Материал			Количество слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм	
	наименование	толщина, мм			В	F, Н
		В	F, Н			
1	Пленкосинтокартон	0,25	0,28	1	0,25	0,28
2	Электронит	0,30	0,30	1	0,30	0,30
3	Лакотканеслюдопласт	0,55	0,55	1	0,55	0,55
4	Пленкосинтокартон	0,25	0,28	1	0,25	0,28
5	«	0,25	0,28	1	0,25	0,28

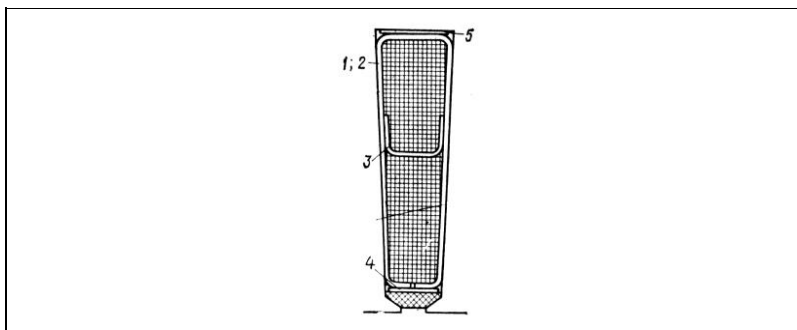


Таблица А.20 – Марки изоляционных материалов

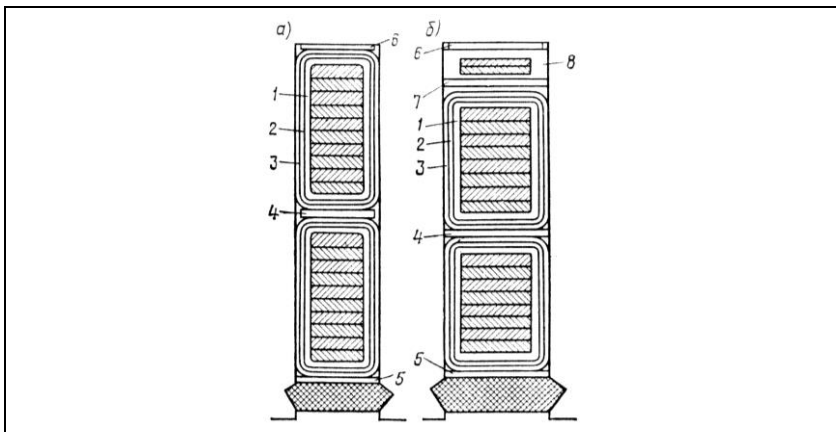
Наименование материала	Марка при классах		
	В	F	Н
Пленкосинтокартон	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н
Лакотканеслюдопласт	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ

Таблица А.21 – Изоляция обмотки статора машин переменного тока. Напряжение до 6300 В. Пазы прямоугольные открытые. Обмотка двухслойная, с жесткими катушками. Провод прямоугольный. Классы нагревостойкости изоляции В, F

Таблица 2.1								
Часть обмотки	Позиция	Материал		Количество слоев	Толщина изоляции (мм) для пазов			
		наименование и марка	Толщина, мм		по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая	1	Стеклослодопластовая лента ЛИ– СК– ТТ	0,14	4 вполнахлест а	2,24	4,48	2,24	4,48
	2	То же, ЛИ– СКу– ТТ	0,14	1 вполнахлест а	0,56	1,12	0,56	1,12
	3	Лента стеклянная	0,10	1 встык	0,20	0,40	0,20	0,40
	–	Разбухание от пропитки компаундом	–	–	0,80	2,80	0,80	2,80
	4	Стеклотекстолит СТ (класс В) и СТЭФ (F)	2,00	1	–	2,00	–	2,00

	5	То же	0,50	1	–	0,50	–	0,50
	6	«	0,50	1	–	0,50	–	0,50
	7	«	0,50	1	–	–	–	0,50
	8	Слюдопластофолий ИФГ– Б	0,15	4,5	–	–	1,10	1,10
	–	Допуск на укладку обмотки	–	–	0,30	0,60	0,50	0,80
	–	Общая толщина изоляции в пазу (без витковой)	–	–	4,10	12,4	4,30	14,2 0
Лобова я	–	Общая толщина изоляции катушки (без витковой)	–	–	3,80	4,40	3,80	4,40

Продолжение таблицы А.21



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Гольдберг, О. Д., Гурин, Я. С., Свириденко, И. С. Проектирование электрических машин: Учебник для втузов / Под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Высш. шк., 1984. – 431 с.

2 Электрические машины : учеб-метод. пособие для самостоятельной проработки курса. В 2 ч. Ч. I. Трансформаторы. Асинхронные машины / В. Г. Черномашенцев, В. А. Пацкевич, В. Н. Галушко; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 131 с.

3 Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые серии 4А мощностью от 0,06 до 400 кВт: ГОСТ 19523–74. – Введ. 18.02.1974. – М: Гос. комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1974. – 39 с.

4 Ярославский электромашиностроительный завод (ОАО "ELDIN") /  
Электродвигатели. – Гомель, 2016. – Режим доступа: <http://www.eldin.ru/catalog/electromotors.php>. – Дата доступа: 12.11.2016.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1 ЕДИНЫЕ СЕРИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....</b>	<b>4</b>
1.1 Общие сведения.....	4
1.2 Исходные данные для проектирования.....	6
1.3 Магнитная цепь двигателя. Размеры, конфигурация, материал.....	7
1.4 Обмотка статора.....	24
1.5 Обмотка короткозамкнутого ротора.....	39
1.6 Обмотка фазного ротора.....	45
1.7 Расчет магнитной цепи.....	50
1.8 Активные и индуктивные сопротивления обмоток.....	60
1.9 Режимы холостого хода и номинальный.....	76
1.10 Круговая диаграмма и рабочие характеристики.....	82
1.11 Максимальный момент.....	88
1.12 Начальный пусковой ток и начальный пусковой момент.....	92
1.13 Тепловой и вентиляционный расчеты.....	99
1.14 Масса двигателя и динамический момент инерции ротора.....	110
1.15 Расчет надежности обмотки статора.....	113
1.16 Технические данные асинхронных двигателей, выпускаемых Ярославским электромашиностроительным заводом (ОАО, ELDIN).....	117
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Справочные таблицы.....</b>	<b>127</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>151</b>

Учебное издание

*ГАЛУШКО Виктор Николаевич*  
*ЕВДАСЕВ Игорь Сергеевич*  
*ПАЦКЕВИЧ Валерий Анатольевич*  
*ДРОБОВ Андрей Владимирович*

## **РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Пособие для выполнения курсовой работы

Редактор И. И. Э в е н т о в  
Технический редактор В. Н. К у ч е р о в а

Подписано в печать .2016 г. Формат 60x84  $\frac{1}{16}$ .  
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 7,25. Тираж 100 экз.  
Зак. № . Изд. № 84.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/361 от 13.06.2014.  
№ 2/104 от 01.04.2014.  
Ул. Кирова, 34, 246653 г. Гомель