

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**Д. А. Хабибуллин, В. В. Тодарев, Л. В. Веппер**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к курсовому проекту по дисциплине  
«Электрические машины» для студентов  
специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение»  
и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2008

УДК 621.87(075.8)  
ББК 31.261я73  
Х12

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
факультета автоматизированных и информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 1 от 11.09.2006 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. фак. иностранных студентов БелГУТа *Н. П. Волков*

**Хабибуллин, Д. А.**  
Х12 Проектирование явнополюсных синхронных машин : метод. указания к курсовому проекту по дисциплине «Электрические машины» для студентов специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. и заоч. форм обучения / Д. А. Хабибуллин, В. В. Тодарев, Л. В. Веппер. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 136 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-695-0.

Представлены задания для выполнения курсового проекта, даны подробные рекомендации по выполнению проекта, а также приведен пример расчета синхронного двигателя. В приложении даны таблицы и графики для выполнения курсового проекта.

Для студентов специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» ГГТУ им. П. О. Сухого.

**УДК 621.87(075.8)  
ББК 31.261я73**

**ISBN 978-985-420-695-0**

© Хабибуллин Д. А., Тодарев В. В.,  
Веппер Л. В., 2008  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2008

## ВВЕДЕНИЕ

Под проектированием электрической машины понимается расчет размеров отдельных ее частей, параметров обмоток, рабочих и других характеристик, конструирование машины в целом, а также ее отдельных деталей, оценка технико-экономических показателей спроектированной машины, включая показатели надежности. Проектирование электрической машины производится с учетом требований государственных и отраслевых стандартов.

Приведенная методика расчета распространяется на синхронные явнополюсные машины мощностью от нескольких киловатт до нескольких мегаватт. Синхронные машины указанного диапазона мощностей обычно изготавливаются сериями. В этих сериях пока еще не принят принцип деления машин по высоте оси вращения, как это сделано у асинхронных двигателей и машин постоянного тока. Синхронные явнополюсные машины принято разделять по габаритам. Каждому габариту соответствует определенный диаметр статора и высота оси вращения.

Руководство к курсовому проектированию из-за ограниченности объема не может содержать все данные, необходимые для расчетов и конструирования электрической машины. Поэтому предполагается, что студент при выполнении проекта будет пользоваться справочной литературой, каталогами и атласами чертежей.

Задание на курсовой проект содержит 100 вариантов. Вариант определяется по двум последним шифрам зачетной книжки студента (табл. 1).

Графическая часть проекта включает два листа формата А1. На первом листе вычерчивается конструкция двигателя с поперечным и продольным разрезами и проставляются в масштабе установочные размеры согласно ГОСТ 20839. На втором листе приводятся обмотка статора, векторные диаграммы, U-образные, рабочие, пусковые характеристики. Второй лист разрешается выполнить на миллиметровой бумаге того же формата. Эскиз полюсов ротора со всеми размерами, магнитной цепи на пару полюсов, изоляция паза статора и катушки обмотки возбуждения вычерчиваются в расчетно-пояснительной записке.

## Задание по курсовому проекту

Номинальные данные							
Номер варианта	Мощность, кВт	Линейное напряжение, В	Частота вращения ротора, об/мин	Номер варианта	Мощность, кВт	Линейное напряжение, В	Частота вращения ротора, об/мин
00	132	380	500	50	800	6000	500
01	160	380	750	51	800	6000	375
02	160	380	600	52	800	6000	300
03	160	380	500	53	800	6000	250
04	200	380	1500	54	1000	6000	3000
05	200	380	750	55	1000	6000	1500
06	200	380	600	56	1000	6000	1000
07	200	380	500	57	1000	6000	750
08	250	380	1500	58	1000	6000	600
09	250	380	750	59	1000	6000	500
10	250	6000	750	60	1000	6000	375
11	250	380	600	61	1000	6000	250
12	250	6000	600	62	1000	6000	300
13	250	380	500	63	1250	6000	3000
14	250	6000	500	64	1250	6000	1500
15	315	380	1500	65	1250	6000	1000
16	315	380	1000	66	1250	6000	750
17	315	6000	1000	67	1250	6000	600
18	315	6000	750	68	1250	6000	500
19	315	380	600	69	1250	6000	375
20	315	6000	600	70	1250	6000	300
21	315	6000	500	71	1600	6000	3000
22	315	6000	375	72	1600	6000	1500
23	315	6000	300	73	1600	6000	1000
24	400	6000	1000	74	1600	6000	750
25	400	6000	750	75	1600	6000	600
26	400	6000	600	76	1600	6000	500
27	400	6000	500	77	1600	6000	375
28	400	6000	375	78	1600	6000	300
29	400	6000	300	79	2000	6000	3000
30	500	6000	1000	80	2000	6000	1500
31	500	6000	750	81	2000	6000	1000
32	500	6000	600	82	2000	6000	750

Номинальные данные							
Номер варианта	Мощность, кВт	Линейное напряжение, В	Частота вращения ротора, об/мин	Номер варианта	Мощность, кВт	Линейное напряжение, В	Частота вращения ротора, об/мин
33	500	6000	500	83	2000	6000	600
34	500	6000	375	84	2000	6000	500
35	500	6000	300	85	2000	6000	375
36	630	6000	1500	86	2500	6000	3000
37	630	6000	1000	87	2500	6000	1500
38	630	6000	750	88	2500	6000	1000
39	630	6000	3000	89	2500	6000	750
40	630	6000	600	90	2500	6000	600
41	630	6000	500	91	2500	6000	500
42	630	6000	300	92	3200	6000	3000
43	630	6000	250	93	3200	6000	1500
44	630	6000	375	94	3200	6000	1000
45	800	6000	3000	95	3200	6000	750
46	800	6000	1500	96	4000	6000	3000
47	800	6000	1000	97	4000	6000	1500
48	800	6000	750	98	4000	6000	1000
49	800	6000	600	99	4000	6000	750

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электромашиностроением разработано и освоено в производстве несколько серий явнополюсных синхронных двигателей общего назначения, которые по своим технико-экономическим показателям соответствуют современным требованиям. К таким сериям следует отнести СД2, СДН2, СДН32. Двигатели данных серий предназначены для привода вентиляторов, насосов, шаровых мельниц и других механизмов, не требующих регулирования частоты вращения. Серию двигателей СД2 выполняют на внешних диаметрах, соответствующих 13-му и 14-му габаритам [2] (табл. 2).

## Двигатели серий СД2, СДН2, СДН32

Габарит	Внешний диаметр статора, мм	Высота оси вращения, мм	Габарит	Внешний диаметр статора, мм	Высота оси вращения, мм
5	280	180	14	850	500
6	327	200	15	990	560
7	393	225	16	1180	630
8	423	250	17	1430	630
9	493	280	18	1730	630
10	520	315	19	2150	630
11	590	355	20	2600	630
12	660	400	21	3250	630
13	740	450			

Машины серии СД2 имеют степень защиты IP23. Серия СДН2 выполнена на диаметрах 16-го и 17-го габаритов. Основное исполнение серии имеет степень защиты IP22, но также имеется модификация со степенью защиты IP43. Двигатели серии СДН32 выполняются 18–21-го габаритов, имеют закрытое исполнение со степенью защиты IP44.

Машины серий СД2, СДН2, СДН32 различаются по способу крепления и конструкции подшипниковых узлов.

В машинах серии СД2 применяются подшипники качения, которые размещаются в подшипниковых щитах.

В двигателях серий СДН2, СДН32 применяют стояковые подшипники.

В двигателях серий СДН2 могут применяться как подшипники качения, так и скольжения. Все машины серии СДН32 имеют подшипники скольжения.

Высота оси вращения для всех машин серий СДН2, СДН32 равна 630 мм, а машин серии СД2 – 450 мм у машин 13-го габарита и 500 мм у машин 14-го габарита.

Охлаждение двигателей указанных серий – воздушное с самовентиляцией.

Синхронные двигатели рассчитаны для работы с опережающим током статора, при коэффициенте мощности  $\cos \varphi_1 = 0,9$ .

Все двигатели выполнены с горизонтальным валом.

Кратность максимального момента  $M_{\max}^* \geq 2$ .

Шкала мощностей выпускаемых двигателей серий СД2, СДН2 представлена в таблице 1.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Для проектирования синхронных двигателей должны быть заданы следующие исходные данные:

1. Номинальный режим работы по ГОСТ 183.
2. Номинальная отдаваемая мощность по ГОСТ 12139.
3. Номинальное линейное напряжение по ГОСТ 21128.
4. Частота вращения по ГОСТ 10683.
5. Частота напряжения.
6. Коэффициент мощности.
7. Кратность максимального момента.
8. Способ соединения фаз статора.
9. Степень защиты от внешних воздействий.
10. Способ охлаждения.
11. Класс нагревостойкости изоляции.
12. Исполнение по способу монтажа.
13. Форма выступающего конца вала.
14. Способ соединения с приводным механизмом.

Дополнительные общие требования: высота оси вращения по ГОСТ 13267; установочно-присоединительные размеры по ГОСТ 20839.

В настоящее время все большее внимание уделяется международной стандартизации и мировым тенденциям в развитии электромашиностроения для того, чтобы выпускаемые электрические машины пользовались спросом и на внешнем рынке. С этой точки зрения технико-экономические показатели электрических машин серий СД2 и СДН2 соответствуют международным стандартам.

Перед началом проектирования необходимо ознакомиться с конструктивными исполнениями двигателей [1], [5].

Данные методуказания предназначены для курсового проектирования явнополюсных синхронных двигателей серии СД2 и СДН2, хотя могут быть использованы и для двигателей серии СДН32.

Синхронные двигатели рассчитываются для работы с опережающим током статора при коэффициенте мощности  $\cos \varphi_1 = 0,9$ .

Фазы статора, как правило, соединяются звездой.

Способ возбуждения – от специальной обмотки, заложенной в пазы статора.

Способ охлаждения ISO1 – защищенная машина с самовентиляцией (вентилятор расположен на валу машины).

Степень защиты от внешних воздействий: IP22 – для машин серии СДН2 и IP23 – для машин серии СД2.

Исполнение по способу монтажа: IM1001 – для двигателей серии СД2 и IM7311 – для двигателей серии СДН2.

Форма выступающего конца вала – цилиндрическая.

Способ соединения с приводным механизмом – упругая муфта.

Класс нагревостойкости изоляции –  $F$ .

Расчет явнополюсных синхронных двигателей в курсовом проекте производится в несколько этапов. Последовательность этапов проектирования соответствует установленным практикой электромашиностроения принципам расчета машин общепромышленного назначения [2], [3], [4].

### Этапы курсового проекта

1. Выбор главных размеров.
2. Сердечник и обмотка статора.
3. Воздушный зазор и полюсы ротора.
4. Расчет демпферной (пусковой) обмотки.
5. Расчет магнитной цепи.
6. Параметры обмотки статора.
7. Определение МДС обмотки возбуждения при нагрузке.
8. Расчет обмотки возбуждения.
9. Параметры обмоток и постоянные времени.
10. Масса активных материалов.
11. Потери и КПД.
12. Тепловой расчет.
13. Характеристики синхронного двигателя.

### 3. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Проектирование синхронных двигателей, как впрочем и любой другой электрической машины, начинают с выбора главных размеров: внутреннего диаметра статора  $D_1$  и расчетной его длины  $l_1$ . Для этого по заданным значениям мощности  $P_{\text{ном}}$  и числа полюсов  $2p$  по таблице 3 выбирают номер габарита двигателя. Эта таблица составлена по техническим данным современных серий синхронных явнополюсных машин, и ею можно пользоваться при проектировании аналогичных машин.

Таблица 3

Номинальная мощность, кВт	Номер габарита при числе полюсов $2p$						
	4	6	8	10	12	16	20
132	–	–	–	–	13	–	–
160	–	–	13	14	14	–	–



Номинальная мощность, кВт	Номер габарита при числе полюсов $2p$						
	4	6	8	10	12	16	20
200	–	–	13	14	14	–	–
250	–	–	13	14	14	–	–
315	–	13	13	14	14	17	17
400	–	13	14	14	16	17	17
500	–	14	14	14	16	17	17
630	14	14	14	16	16	17	–
800	14	14	16	16	17	17	–
1000	14	16	16	16	17	17	–
1250	–	16	16	17	17	–	–
1600	–	16	17	17	17	–	–
2000	–	16	17	17	–	–	–
2500	–	17	17	–	–	–	–
3200	–	17	–	–	–	–	–
4000	–	17	–	–	–	–	–

Выбрав номер габарита по таблице 3, находим наружный диаметр сердечника статора  $D_{1н}$  (табл. 2). Затем определяем внутренний диаметр статора, мм:

$$D_1 = \frac{D_{1н}}{k_D}, \quad (1)$$

где  $k_D$  – коэффициент, который зависит от числа полюсов и принимает значения, указанные в таблице 4:

Таблица 4

$2p$	4	6	8	10	12	16	20	24
$k_D$	1,52	1,46	1,42	1,32	1,30	1,25	1,20	1,18

Полученное значение  $D_1$  округляют до целого числа и определяют полюсное деление, мм:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p}. \quad (2)$$

Расчетная мощность синхронного двигателя, кВА:

$$P_i = \frac{k_E \cdot P_{ном}}{\eta'_{ном} \cdot \cos\varphi}, \quad (3)$$

где  $k_E$  – коэффициент, представляющий собой отношение ЭДС обмотки статора  $E_{1ном}$  при номинальной нагрузке машины к номинальному напряжению  $U_{1ном}$ . При работе синхронного двигателя с опережающим током и  $\cos\varphi = 0,9$  можно принять  $k_E \approx 1,05 \div 1,06$  [1].

Предварительное значение КПД  $\eta'_{ном}$  принимают по таблице 5 или по каталогу в зависимости от выбора базовой машины.

По расчетной мощности  $P_i$  и полученному диаметру  $D_1$  находят расчетную длину сердечника статора, мм:

$$l_i = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot P_i}{k_B \cdot k_{об1} \cdot \alpha_i \cdot n \cdot D_1^2 \cdot B'_\delta \cdot A'_1}, \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия (рис. 1).

*Примечание.* Здесь и далее по тексту ссылки даются на рисунки, расположенные в разделе 16;

$k_B$  – коэффициент формы поля (рис. 1);

$k_{об1}$  – обмоточный коэффициент обмотки статора;

$D_1$  – внутренний диаметр статора, мм;

$n$  – частота вращения, об/мин;

$A'_1$  – предварительная линейная нагрузка статора, А/м;

$B'_\delta$  – предварительное максимальное значение индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке, Тл.

Коэффициенты  $k_B$  и  $\alpha_i$  зависят от размеров и конфигурации полюсного наконечника, а также воздушного зазора и полюсного деления. Поскольку на данной стадии расчета эти значения неизвестны, то предварительно можно принять  $\alpha_i = 0,65 \div 0,68$  и  $k_B = 1,16 \div 1,14$ , а их произведение равно  $\alpha_i \cdot k_B = 0,75 \div 0,78$  (эти значения соответствуют  $\delta_m / \delta = 1,5$  и  $\delta / \tau \approx 0,01$ ).

Таблица 5

Предварительное значение КПД

$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин							
	1500	1000	750	600	500	375	300	250
132	–	–	–	–	90,9	–	–	–
160	–	–	92	91,8	91,4	–	–	–
200	–	–	93,0	92,4	91,8	–	–	–
250	–	94,2	93,5	93	92	–	–	–
315	–	94,3	93,9	93,4	–	91,25	91,27	90,8
400	–	94,6	94	93,9	92,9	91,6	91,94	92

$P_n$ , кВт	$n_n$ , об/мин							
	1500	1000	750	600	500	375	300	250
500	–	94,7	94,4	94,3	93,7	92,65	93	93
630	95	95,0	94,9	94,6	94,28	93,4	93,34	93,5
800	95,6	95,6	94,95	95,17	94,42	94,2	93,9	93,9
1000	95,63	95,63	95,5	95,4	95	95	94,4	94,45
1250	–	95,9	95,8	95,54	95,45	95,3	94,66	94,66
1600	–	96,3	96	96	95,85	95,77	95,2	95,0
2000	–	96,8	96,3	96,3	96,2	95,78	95,7	95,4
2500	–	96,8	96,7	96,6	96,5	96,23	95,72	95,65
3200	–	97	96,8	96,8	96,6	96,6	96,1	96
4000	–	97,2	97	96,83	96,76	96,54	96,3	96,2

Обмоточный коэффициент  $k_{об1}$  определяют по шагу обмотки статора и числу пазов на полюс и фазу. Предварительно  $k_{об1}$  можно взять равным 0,92, что примерно соответствует шагу обмотки  $y = 0,83 \cdot \tau$ .

При определении расчетной длины статора  $l_i$  синхронного двигателя по (4) предварительные значения линейной нагрузки  $A'_1$  принимают по рис. 2, а магнитной индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке  $B'_\delta$  – по рис. 3.

Данные, приведенные на рис. 2 и 3, соответствуют исполнению машин с изоляцией класса нагревостойкости  $F$ . При проектировании машины с изоляцией другого класса нагревостойкости значения  $A'_1$ , полученные из рис. 2, умножают на поправочный коэффициент, равный 0,86 (при классе  $B$ ) или 1,14 (при классе  $H$ ). Значения  $B'_\delta$  при классах нагревостойкости изоляции  $B$  и  $H$  остаются такими же, как и для класса  $F$ .

Найденные из рис. 2 или рис. 3 значения  $A'_1$  и  $B'_\delta$  следует рассматривать как предварительные. В дальнейшем расчете при необходимости их можно изменить. При этом следует иметь в виду, что в зависимости от выбора  $A_1$  и  $B_\delta$  изменяется активный объем  $D^2 \cdot l_i$ . Чем больше произведение  $A_1 \cdot B_\delta$ , тем меньший объем будет иметь машина. Однако величины  $A_1$  и  $B_\delta$  имеют свои верхние пределы.

Основным фактором, ограничивающим линейную нагрузку, является нагрев обмотки, так как с возрастанием  $A_1$  в ней увеличиваются электрические потери.

Верхний предел индукции  $B_\delta$  ограничен главным образом насыщением магнитной цепи и, в первую очередь, насыщением зубцового слоя.

Следует отметить, что от отношения  $A_1/B_\delta$  зависят индуктивные сопротивления обмотки. С увеличением этого отношения индуктивные сопротивления возрастают.

Определив расчетную длину машины  $l_i$ , мм и, округлив ее до целого числа, находят отношение:

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau}. \quad (5)$$

В зависимости от числа полюсов  $2p$  полученное значение  $\lambda$  должно находиться в пределах:

Таблица 6

$2p$	4	6; 8	10	12 и более
$\lambda$	0,7–1,3	0,8–1,6	1,0–2,0	1,2–2,3

Размеры активной части синхронной явнополюсной машины показаны на рис. 4.

От  $\lambda$  зависят ряд показателей машины и условия ее охлаждения. Чем длиннее машина (больше  $\lambda$ ), тем хуже условия ее охлаждения. У машин небольшой мощности, при  $l_i < 250 \div 300$  мм магнитопровод статора выполняется из одного пакета.

При  $l_i \geq 300$  мм сердечник статора разделяют на пакеты радиальными вентиляционными каналами (рис. 5) шириной  $b_k = 10$  мм. Обычно все пакеты делают одинаковой длины  $l_{\text{пак}} = 40 \div 60$  мм.

При наличии вентиляционных каналов истинная длина статора будет больше расчетной и может быть найдена по выражению:

$$l_1 = l_i + n_k \cdot b_k, \quad (6)$$

где  $n_k$  – число радиальных вентиляционных каналов;

$b_k = 10$  мм – ширина вентиляционного канала.

Количество радиальных вентиляционных каналов сердечника статора:

$$n_k = n_{\text{п1}} - 1, \quad (7)$$

где  $n_{\text{п1}}$  – число пакетов стали в сердечнике статора.

Количество пакетов стали в сердечнике статора:

$$n_{п1} = \frac{l_i}{l_{п1}}, \quad (8)$$

где  $l_{п1} = 40 \div 60$  мм – длина пакета стали.

#### 4. СЕРДЕЧНИК И ОБМОТКА СТАТОРА

При расчете синхронных машин с  $h \geq 400$  мм (более габарита 11), согласно рекомендациям [3], в статоре принимают прямоугольные открытые пазы (рис. 6).

Наибольшая ширина рулонов (листов) тонколистовой электротехнической стали составляет 1000 мм, поэтому сердечник статора, начиная с наружного диаметра  $D_{1н} = 1180$  мм (16-й габарит) делают сегментированным, т. е. листы сердечника статора составляют из целого числа сегментов  $C$ . При этом каждый сегмент должен иметь целое число пазов:

$$z_c = \frac{z_1}{C}, \quad (9)$$

где  $z_c$  – число пазов в сегменте (берется от 8 до 20);

$z_1$  – число пазов статора;

$C$  – число сегментов, обычно равно целому числу в пределах  $6 \div 18$ .

Линии стыков сегментов должны проходить через середины пазов (рис. 7). При укладке каждого слоя (кольца) необходимо предусмотреть между сегментами по  $0,4 \div 0,6$  мм, чтобы исключить нахлест краев сегментов друг на друга. Стыки сегментов соседних слоев сердечника статора должны быть смещены относительно друг друга на несколько пазовых делений.

Раскрой стандартного листа электротехнической стали на сегменты показан на рис. 8. Длина большой хорды сегмента, мм:

$$H_c = D_{1н} \cdot \sin(180^\circ / C). \quad (10)$$

При выборе числа пазов в сердечнике статора  $z_1$  руководствуются рекомендациями, выработанными на основании опыта проектирования синхронных машин. По рис. 9 и полученному значению полюсного деления определяют два значения зубцового деления: минимальное  $t_{1\min}$  и максимальное  $t_{1\max}$ . Затем определяют соответ-

венно максимальное  $z_{1\max}$  и минимальное  $z_{1\min}$  числа пазов, допускаемое в проектируемой машине:

$$z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{1\min}}; \quad z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{1\max}}. \quad (11)$$

Полученные по (11) значения округляют до целых чисел. Из полученного диапазона возможных значений  $z_1$  выбирают число пазов, для которого соблюдаются следующие условия:

1. Число пазов должно быть кратным числу фаз  $m_1$  и числу параллельных ветвей  $a_1$ , т. е.  $\frac{z_1}{m_1 \cdot a_1}$  – целое число.

2. Число пазов на полюс и фазу  $q_1 = \frac{z_1}{2p \cdot m_1}$  должно быть либо целым числом ( $q_1 = 2 \div 5$ ) при  $2p < 8$  (меньшее значение  $q_1$  соответствует большему  $2p$ ), либо дробным числом  $\left(1\frac{1}{2} < q_1 < 3\right)$  для машин с числом полюсов  $2p \geq 8$ ; дробное число  $q_1$  должно иметь вид:

$$q_1 = b + \frac{c}{d}, \quad (12)$$

где  $b$  – целое число, а  $\frac{c}{d}$  – правильная несократимая дробь, причем  $d$  – знаменатель дробной части числа  $q_1$ .

3. Число пазов на полюс и фазу  $q_1 = \frac{z_1}{2p \cdot m_1}$  должно быть связано с числом параллельных ветвей следующим образом:

а) при целом  $q_1$  отношение  $\frac{2p}{a_1}$  должно быть целым числом;

б) при дробном  $q_1$  отношение  $\frac{2p}{a_1 \cdot d}$  должно быть целым числом,

где  $d$  – знаменатель дробной части.

4. При  $D_{н1} \geq 900$  мм необходимо, чтобы число пазов  $z_1$  для удобства сегментирования разлагалось на возможно большее число простых множителей (2, 3, 5, 7, 11, и т. д.).

Перечисленным условиям обычно удовлетворяют несколько значений  $z_1$ .

Для каждого значения  $z_1$  определяют число эффективных проводников в пазу  $u_{\text{п}}$  и линейную нагрузку  $A_1$  и окончательно принимают такое значение  $z_1$ , для которого уточненное значение линейной нагрузки  $A_1$  минимально отличается от предварительно принятого значения  $A'_1$  (не более чем на 5 %). Если же сердечник статора сегментирован (габарит 16 и более), то для каждого значения  $z_1$  следует определить хорду сегмента  $H_c$  (10), а принятое для дальнейшего расчета значение  $z_1$  должно удовлетворять еще и условию минимальных отходов при раскрое сегментов и стандартного листа электротехнической стали, имеющей размеры 600×1500, 750×1500, 860×1720, 1000×2000 мм. Другими словами, хорда сегмента  $H_c$  должна быть немногим меньше ширины стандартного листа.

Для получения симметричной двухслойной обмотки должно соблюдаться условие [3]:

$$\frac{z_1}{\rho \cdot m_1} = K, \quad (13)$$

где  $K$  – целое число;

$\rho$  – общий наибольший делитель чисел  $z_1$  и  $p$ ;

$m_1$  – количество фаз.

Для статоров синхронных двигателей серий СД2, СДН2 общего назначения находят применение двухслойные катушечные петлевые обмотки (прил. 1) с числом эффективных проводников в пазу  $u_{\text{п}}$  более двух. По условиям технологии каждый эффективный проводник в зависимости от его сечения состоит из нескольких элементарных прямоугольных проводников с поперечным сечением 12÷20 мм<sup>2</sup>. Ток в таком составном проводнике допускается до 150÷200 А. Если номинальный фазный ток машины  $I_{1\text{ном}}$  превышает указанные пределы, то обмотку выполняют из нескольких параллельных ветвей.

Номинальный ток статора, А:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{1\text{ном}} \cdot \eta' \cdot \cos \varphi}, \quad (14)$$

где  $m_1$  – число фаз;

$U_{1\text{ном}} = \frac{U_c}{\sqrt{3}}$  (схема соединения статора – звезда) – фазное напряжение.

Необходимое число параллельных ветвей обмотки статора равно:

$$a_1 = \frac{I_{\text{НОМ}}}{150 \div 200}. \quad (15)$$

Число эффективных проводников в пазу статора:

$$u_{\text{п}} = \frac{t_1 \cdot A'_1 \cdot a_1 \cdot 10^{-3}}{I_{\text{НОМ}}}, \quad (16)$$

где  $t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{z_1}$  – зубцовое деление статора, т. е. расстояние между осями двух соседних зубцов, измеренное по внутреннему диаметру статора, мм.

Полученное значение  $u_{\text{п}}$  округляют до четного числа и уточняют значение линейной нагрузки, А/м:

$$A_1 = \frac{u_{\text{п}} \cdot z_1 \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}{a_1 \cdot \pi \cdot D_1}. \quad (17)$$

Далее рассчитывают площадь поперечного сечения эффективного проводника обмотки статора, мм<sup>2</sup>:

$$S'_{1\text{эф}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{a_1 \cdot \Delta'_1}, \quad (18)$$

где  $\Delta'_1$  – предварительное значение плотности тока в обмотке статора.

Плотность тока  $\Delta'_1$  синхронных машин при изоляции класса нагревостойкости  $B$  и напряжении сети  $U_{\text{с ном}} \leq 6000$  В принимают в зависимости от габарита машины (табл. 7):

Таблица 7

Габарит машины	12÷14	16÷17	18÷21
$\Delta'_1$ , А/мм <sup>2</sup>	5,5÷5,8	5,0÷5,5	4,8÷5,0

Здесь меньшие значения плотности тока относятся к многополюсным машинам. При изоляции класса нагревостойкости  $F$  приведенные значения плотности тока следует умножать на 1,12. При напряжении сети 10 кВ  $\Delta'_1$  необходимо умножить на 0,85. При выборе предварительного значения плотности тока следует помнить, что с увеличением  $\Delta'_1$  уменьшается расход обмоточной меди, но при этом



растут потери в обмотке статора и ее рабочая температура. С уменьшением  $\Delta'_1$  растёт КПД машины, повышается ее надежность, но ухудшается использование активных материалов.

Затем выбирают стандартное сечение обмоточного провода (прил. 2–4). При определении размеров проводника можно исходить из следующих рекомендаций.

В целях уменьшения потерь от вихревых токов проводники в паз укладываются «плашмя». Количество элементарных проводов в одном эффективном выбирают так, чтобы сечение провода не превышало  $18 \text{ мм}^2$  с размером по высоте  $a \leq 3,0 \div 3,5 \text{ мм}$ . По ширине паза обычно укладывают не более двух проводов («плашмя»), а по высоте не более четырех.

Общее число элементарных проводников в пазу

$$n_{\text{п}} = n_{\text{эл}} \cdot u_{\text{п}}, \quad (19)$$

где  $n_{\text{эл}}$  – количество элементарных проводников в одном эффективном.

Опыт проектирования и теоретический анализ показывают, что с точки зрения наилучшего использования машины существует оптимум ширины паза  $b_{\text{пл}}$  к зубцовому делению  $t_1$ . При прямоугольных пазах, которые применяют для машин мощностью выше 100 кВт, оптимальное отношение  $\frac{b_{\text{пл}}}{t_1}$  в среднем составляет 0,42, причем небольшие

отклонения существенно не отражаются на показателях машины. Исходя из этого, можно предварительно определить ширину паза по соотношению:

$$b'_{\text{пл}} \approx (0,34 \div 0,50) t_1. \quad (20)$$

Большие значения относятся к машинам меньших габаритов. Ширину паза берут тем больше, чем выше напряжение машины и чем толще изоляция. При узких пазах снижается коэффициент заполнения паза медью. С другой стороны, с увеличением ширины паза увеличиваются добавочные потери на поверхности полюсных наконечников. Обычно ширина паза лежит в пределах  $10 \div 20 \text{ мм}$ .

Окончательно ширину паза устанавливают после выбора проводников обмотки.

Одновременно с выбором стандартного прямоугольного сечения элементарного провод  $q_{\text{1эл}}$  определяют и его размеры  $a$  и  $b$  (прил. 2–4).

Возможная ширина изолированных проводников

$$b'_{\text{из}} = b'_{\text{пл}} - \delta_{\text{из.п}} \quad (21)$$

Двусторонняя толщина изоляции паза по его ширине  $\delta_{\text{из.п}}$  зависит от конструкции изоляции и номинального напряжения машины.

При выборе конструкции системы изоляции обмотки статора синхронных машин до 10000 В, габаритов 13, 14, 16, 17 следует руководствоваться таблицей 8.

Таблица 8

**Непрерывная изоляция класса В катушек статорных обмоток машин переменного тока на напряжение до 10000 В**

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев, не менее	Толщина изоляции, мм	
		Наименование	Толщина, мм		по ширине	по высоте
 <p>Пазовая</p>	1	<i>Витковая изоляция</i>	—			
	2	<i>Изоляция проводника</i> <i>Корпусная изоляция</i>	0,13			
	3	Стеглослюдинитовая лента ЛС: при $U = 10,5$ кВ $U = 6,6$ кВ $U \leq 660$ В	0,1	9 вполнахлеста	6	6
				6 вполнахлеста	4,5	4,5
				3 вполнахлеста	2	2
	4	Лента стеклянная ЛЭС Толщина изоляции катушечной стороны: при $U = 10,5$ кВ $U = 6,6$ кВ $U \leq 660$ В	0,1	1 встык	0,2	0,2
				6,2	6,2	
				4,7	4,7	
5, 6	<i>Прокладки в пазу</i> Стеклотекстолит СТ-1	1	2	2	2	
			Стеклотекстолит СТ-1	0,5	2	1
		Общая толщина изоляции на паз: при $U = 10,5$ кВ $U = 6,6$ кВ $U \leq 660$ В				
					6,2	15,4
					4,7	12,4
					2,2	7,4

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев, не менее	Толщина изоляции, мм	
		Наименование	Толщина, мм		по ширине	по высоте
 Лобовая	1	Изоляция проводника	–		–	–
	7	Стеклослюдинитовая лента ЛС: при $U = 10,5$ кВ $U = 6,6$ кВ $U \leq 660$ В	0,13	9 вполнахлеста 6 вполнахлеста 3 вполнахлеста	6 4,5 2	6 4,5 2
	8	Лента стеклянная ЛЭС (покровная)	0,1	1 встык	0,2	0,2
		Неплотности и неровности	–	–	1	1
		Общая толщина изоляции катушечной стороны: при $U = 10,5$ кВ $U = 6,6$ кВ $U \leq 660$ В			7,2 5,7 3,2	7,2 5,7 3,2

Примечание. Толщина изоляции дана после опрессовки.

В таблице 8 рассматривается конструкция системы изоляции обмоток статора класса нагревостойкости В. Для других классов нагревостойкости, в частности F, H, необходимо воспользоваться таблицей 9, в которой используются те же изоляционные материалы, что и в таблице 8, только других марок.

Таблица 9

Наименование материала	Марка при классах		
	В	F	H
Лента стеклянная – 0,1 мм	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС
Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК
Лента стеклослюдинитовая – 0,13 мм	ЛС	ЛС	–
Лента стеклослодопластовая – 0,14 мм	ЛИ-СК-ТТ	ЛИ-СК-ТТ	ЛИ-СК-ТТ
Стеклолакоткань – 0,15мм	ЛСК	ЛСК	ЛСК

Используя данные таблицы, определяют двустороннюю толщину изоляции по ширине  $C_b$  и по высоте  $C_h$  паза.

Для обмоток статоров высоковольтных синхронных машин, при напряжении 10 кВ, применяют провода марки ПСД с дополнительной изолировкой провода стеклослюдинитовой лентой толщиной 0,09 мм в один слой вполнахлеста. При напряжении от 3 до 6 кВ применяют обмоточный провод марки ПЭТВСД с эмалево-волокнистой изоляцией (прил. 4).

При напряжении  $U_{1\text{ном}} \leq 660$  В применяют обмоточные провода марок ПСД и ПЭТВП.

По найденному значению  $b'_{1\text{из}}$  и приложений 2–4 подбирается стандартный элементарный проводник нужного сечения так, чтобы его ширина  $b'_{1\text{из}}$  (с изоляцией самого проводника) была равна:

$$b_{1\text{из}} \approx \frac{b'_{1\text{из}}}{n_{\text{эл.б}}} \leq 7,5 \text{ мм}, \quad (22)$$

где  $n_{\text{эл.б}}$  – число элементарных проводников по ширине паза (обычно один или два).

Одновременно с шириной определяют и толщину стандартного проводника  $a_{1\text{из}}$  (с изоляцией), а также его сечение  $S_{1\text{эл}} = a_1 \cdot b_1$ .

Сечение  $q_{1\text{эл}}$  должно удовлетворять условию:

$$q_{1\text{эл}} \geq \frac{q'_{1\text{эф}}}{n_{\text{эл}}}, \quad S_{1\text{эл}} \geq \frac{S'_{1\text{эф}}}{n_{\text{эл}}}, \quad (23)$$

где  $n_{\text{эл}}$  – число элементарных проводников в одном эффективном.

Двусторонняя толщина изоляции проводников различных марок дана в приложении 4.

После выбора проводников уточняют размеры паза:

– ширина паза, мм:

$$b_{\text{пл}} = n_{\text{эл.б}} \cdot b_{1\text{из}} + C_b + \delta_{\text{pb}} + \delta_b; \quad (24)$$

– высота паза, мм:

$$h_{\text{z1}} = n_{\text{эл.б}} \cdot a_{1\text{из}} + C_h + \delta_{\text{ph}} + h_{\text{к}} + \delta_h. \quad (25)$$

Здесь  $n_{\text{эл.б}}$  и  $n_{\text{эл.б}}$  – количество элементарных проводов по ширине и высоте паза;  $\delta_{\text{pb}}$  и  $\delta_{\text{ph}}$  – припуски на разбухание изоляции по ширине и высоте паза:  $\delta_{\text{pb}} = 0,05 \cdot n_{\text{эл.б}}$ ;  $\delta_{\text{ph}} = 0,05 \cdot n_{\text{эл.б}}$ .

Высота паза под клин принимается равной  $h_{\text{к}} = 4 \div 5$  мм;  $\delta_b$ ,  $\delta_h$  – технологические допуски,  $\delta_b = \delta_h = 0,2$  мм.

Полученные размеры паза округляют до десятых долей миллиметра.

Обычно  $\frac{h_{z1}}{b_{п1}} = (4 \div 6,5)$  для машин с  $U_{\text{ном}} = 6000 \div 6600$  В и  $(3,5 \div 4,5)$  – для машин с  $U_{\text{ном}} = 380 \div 400$  В.

Далее производят уточнение сечения эффективного проводника и плотности тока в нем. Сечение эффективного проводника  $S_{1\text{эф}}$  равно сумме сечений элементарных проводников:

$$S_{1\text{эф}} = n_{\text{эл}} \cdot S_{1\text{эл}}. \quad (26)$$

Фактическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>:

$$\Delta_1 = \frac{I_{\text{ном}}}{a_1 \cdot S_{1\text{эф}}}. \quad (27)$$

Окончательно размеры паза устанавливают после вычерчивания масштабного эскиза паза, составления его подробной спецификации и проверки максимальной индукции в зубце, индукции в спинке статора, а также перепада температуры в изоляции.

Максимальная индукция в зубце статора, Тл,

$$B_{z1\text{max}} = \frac{B'_\delta \cdot t_1}{(t_1 - b_{п1}) \cdot k_{c1}}, \quad (28)$$

где  $k_{c1} = 0,95$  – коэффициент заполнения пакета сталью при лакировке листов.

Индукция в спинке статора, Тл,

$$B_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B'_\delta}{h_{c1} \cdot k_{c1}}, \quad (29)$$

где  $h_{c1}$  – высота спинки статора, мм:

$$h_{c1} = 0,5 \cdot (D_{н1} - D_1) - h_{z1}. \quad (30)$$

Для низковольтных машин полученные значения  $B_{z1\text{max}}$  и  $B_{c1}$  не должны превышать  $B_{z1\text{max}} = 1,7 \div 1,9$  Тл и  $B_{c1} = 1,4 \div 1,6$  Тл. При напряжениях 6 и 10 кВ эти значения индукций не должны быть больше  $B_{z1\text{max}} = 1,6 \div 2,2$  Тл и  $B_{c1} = 1,2 \div 1,5$  Тл. Если же полученные по (28) и (29) значения магнитных индукций превышают допустимые пределы, то следует пересчитать размеры паза статора и сечение проводов.

Перепад температуры в изоляции паза [2]:

$$\Delta\theta_{\text{из1}} = \frac{\Delta_1 \cdot A_1 \cdot k_{\phi}}{4,2 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{t_1}{2 \cdot (b_{\text{пл}} + h_{z1} - h_{\text{к}})} \cdot \frac{0,5 \cdot \delta_{\text{из.п.}}}{\lambda_{\text{из}}}, \quad (31)$$

где  $k_{\phi} = 1,03 \div 1,1$  – коэффициент добавочных потерь;

$\lambda_{\text{из}}$  – теплопроводность изоляции ( $\lambda_{\text{из}} = 1 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м·°С) – для некомпандинированной изоляции;  $\lambda_{\text{из}} = 1,6 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м·°С) – для компандинированной изоляции;  $\lambda_{\text{из}} = 2,2 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м·°С) – для изоляции, выполненной по способу монолит).

Для изоляции класса нагревостойкости  $B$  температура  $\Delta\theta$  не должна превышать  $30 \div 35$  °С.

В формуле (31) линейные размеры подставляются с метрах,  $\Delta_1$  в А/м<sup>2</sup>,  $A_1$  в А/м.

Если перепад температуры превышает рекомендуемый предел, то следует либо повысить площади поперечных сечений провода и паза, для чего необходимо уменьшить размеры высоты спинки статора и зубца, с учетом того, чтобы  $B_{\text{с1}}$  и  $B_{z1\text{max}}$  не превышали допустимых значений, либо удлинить сердечники статора и ротора. При этом увеличится магнитный поток и уменьшится количество проводников в пазу.

Число последовательных витков в обмотке фазы статора

$$\omega_1 = \frac{P \cdot q_1 \cdot u_{\text{п}}}{a_1}. \quad (32)$$

Обмоточный коэффициент обмотки статора:

$$k_{\text{об1}} = k_{\text{р1}} \cdot k_{\text{y1}}, \quad (33)$$

где  $k_{\text{р1}}$  – коэффициент распределения:

$$k_{\text{р1}} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}}; \quad (34)$$

$k_{\text{y1}}$  – коэффициент укорочения:

$$k_{\text{y1}} = \sin \frac{\pi \cdot \beta}{2}, \quad (35)$$

где  $\beta$  – относительный шаг обмотки статора.

При дробном числе пазов на полюс и фазу  $q_1 = b + \frac{c}{d}$  в (34) вместо  $q_1$  подставляют  $b \cdot d + c$ .

Двухслойные обмотки статора выполняют с укороченным шагом. При  $2p \geq 4$  относительный шаг обмотки статора  $\beta$  предварительно принимают  $\beta' = 0,80 \div 0,86$ . Тогда шаг обмотки статора по пазам:

$$y_1 = \frac{\beta' \cdot z_1}{2p}. \quad (36)$$

Полученное значение  $y_1$  округляют до целого числа, а затем уточняют значение  $\beta$

$$\beta = \frac{2p \cdot y_1}{z_1}, \quad (37)$$

и определяют коэффициент укорочения по (35).

## 5. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР И ПОЛЮСЫ РОТОРА

Зазор  $\delta$  между сердечником статора и полюсными наконечниками ротора является одним из важнейших параметров синхронной машины, во многом определяющим ее технико-экономические показатели.

Так же как и у асинхронных двигателей уменьшение зазора  $\delta$  способствует уменьшению потерь, а следовательно, повышению КПД, но при этом удорожается изготовление машины и снижается ее надежность из-за возникновения опасности задевания полюсами ротора сердечника статора. При увеличении зазора возрастают размеры полюсов ротора и полюсных катушек, увеличиваются потери в обмотке возбуждения. Необходимо также учитывать влияние значения зазора на синхронное индуктивное сопротивление якоря (статора) по продольной оси  $X_d$ . Этот параметр в значительной степени определяет перегрузочную способность синхронной машины  $M_{\max*} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$ .

Воспользовавшись рис. 10 можно по заданной перегрузочной способности определить соответствующее относительное значение индуктивного сопротивления  $X_{d*}$ , а затем из выражения

$$\delta \approx k_x \cdot 10^{-6} \cdot \frac{A_1}{B'_\delta} \cdot \frac{\tau}{X_{d^*}} \quad (38)$$

определить требуемое значение воздушного зазора  $\delta$ , мм. Коэффициент  $k_x$  в (38) принимают равным  $k_x = 0,27 \div 0,33$ , причем меньшие значения  $k_x$  соответствуют большему значению  $X_{d^*}$ .

Согласно ГОСТ 183 для синхронных двигателей общего назначения  $\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} \geq 1,65$ . Например, синхронные двигатели СД2 имеют перегрузочную способность  $1,7 \div 1,8$ , а синхронные двигатели серий СДН2 16-го габарита имеют  $\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = 1,7 \div 1,9$ , 17-го габарита –

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = 1,8 \div 2,5.$$

При неравномерном воздушном зазоре и отношении  $\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5$ , которое обычно принимают в синхронных явнополюсных машинах, среднее значение воздушного зазора, мм:

$$\delta_{\text{ср}} = \delta + \frac{\delta_{\max} - \delta}{3} \approx 0,78 \cdot \delta_{\max}. \quad (39)$$

Полюсы ротора обычно шихтуют из листов, выштампованных заодно с полюсным наконечником. Для полюсов чаще всего применяют листовую сталь марки Ст3 толщиной 1,0 или 1,5 мм. Листы обычно не лакируют, так как имеющаяся на их поверхности тонкая оксидная пленка является достаточной изоляцией для ограничения вихревых токов в полюсных наконечниках, обусловленных пульсацией магнитной индукции в зазоре из-за зубчатости статора.

На рис. 11 показана конструкция полюса ротора синхронной машины, где сердечник полюса 3, выполненный заодно с полюсным наконечником, крепится на шихтованном ободе 2 посредством Т-образного хвостовика. Этот хвостовик запирается в отверстии обода двумя парами стальных клиньев (шпонок) 8. Обод посажен на вал 1. Для предотвращения распушения сердечника полюса с двух сторон предусматривают стальные щеки 4, стянутые шпильками. Щеки имеют заплечики, удерживающие полюсную катушку 5. В пазах полюсного наконечника расположены стержни 6 пусковой (успокоитель-



ной) клетки, соединенные с двух сторон короткозамыкающими сегментами 7.

Ширину сердечника полюса  $b_m$ , мм, определяют по предварительному допустимому значению магнитной индукции в основании сердечник полюса  $B'_m = 1,4 \div 1,6$  Тл :

$$b_m = \frac{\alpha_i \cdot B'_\delta \cdot \tau \cdot l_i \cdot \sigma'_m}{B'_m \cdot k_{ст} \cdot l'_m}, \quad (40)$$

где  $k_{ст}$  – коэффициент заполнения сердечника полюса сталью: при толщине листов 1,0 мм  $k_{ст} = 0,95$ , а при толщине 1,5 мм  $k_{ст} = 0,97$ ;

$l'_m$  – расчетная длина полюса, мм;

$\sigma'_m = \frac{\Phi_m}{\Phi}$  – предварительное значение коэффициента рассеяния полюсов:

$$\sigma'_m = 1 + \frac{350 \cdot k_\sigma \cdot \delta_{ср}}{\tau^2}, \quad (41)$$

где  $\delta_{ср}$  и  $\tau$  рассчитывается в мм.

Значение коэффициента  $k_\sigma$  зависит от высоты полюсного наконечника  $h_p$  и определяется по таблице 10:

Таблица 10

$h_p$ , мм	30	40	50	60	70
$k_\sigma$	7	8,5	10	11	12

Высоту  $h_p$  принимают по рис. 12.

Ширину полюсного наконечника  $b_p$ , мм, определяют по конструктивному коэффициенту полюсного перекрытия  $\alpha = 0,68 \div 0,73$ :

$$b_p = \alpha \cdot \tau. \quad (42)$$

Расчетная длина сердечника полюса, мм:

$$l'_m = l_m + l_{щ}, \quad (43)$$

где  $l_m$  – длина полюса, мм;

$l_{щ}$  – толщина щеки, мм (рис. 11).

Длину полюса (полюсного наконечника)  $l_m$  принимают равной длине сердечника статора  $l_1$  или на 10–20 мм меньше.

Толщину нажимной щеки полюса, мм, берут  $l_{щ} = 15 \div 30$  мм.

Предварительное значение высоты полюса  $h_m$ , мм, определяют по одной из приведенных ниже формул:

– машины 10–15 габаритов при  $2p = 4$  и 6:

$$h_m = (0,45 \div 0,55) \cdot b_p; \quad (44)$$

при  $2p \geq 8$ :

$$h_m = 10,5 \cdot \delta + 80; \quad (45)$$

– машины 16–20 габаритов

$$h_m \approx 16 + 33,5 \cdot \sqrt[4]{\tau}. \quad (46)$$

Размеры обода (длину  $l_{об}$  и высоту  $h_{об}$ ) определяют следующим образом. Длина обода, мм:

$$l_{об} = l'_m + \Delta l. \quad (47)$$

Предварительно  $\Delta l = 50 \div 100$  мм. После расчета полюсной катушки длина обода уточняется и принимается равной наружному размеру катушки по продольной оси машины (рис. 11).

Высота обода, мм:

$$h_{об} = \frac{\sigma'_m \cdot \alpha_i \cdot B'_\delta \cdot \tau \cdot l_i}{2 \cdot B'_{об} \cdot l_{об}}, \quad (48)$$

где  $B'_{об} = 1,0 \div 1,3$  Тл.

## 6. РАСЧЕТ ПУСКОВОЙ ОБМОТКИ

Пусковую (демпферную) обмотку размещают в пазах полюсных наконечников. В двигателях эта обмотка необходима для асинхронного пуска и успокоения качаний ротора. Расчет демпферной обмотки заключается в определении количества и размеров стержней обмотки, а также размеров короткозамыкающих сегментов. Короткозамыкающие сегменты замыкают все стержни с торцов полюса и соединяются с сегментами соседних полюсов, образуя кольцо (рис. 13).

Количество стержней пусковой обмотки на одном полюсе  $N_c = 5 \div 10$ . Стержни обычно имеют круглое сечение, выполняются из меди, а в некоторых случаях для получения повышенного пускового момента – из латуни. Возможна и комбинация: крайние стержни выполняют латунными, а средние – медными.

Площадь поперечного сечения стержня клетки, мм<sup>2</sup>:

$$\delta'_c = \frac{k_{\text{ПК}} \cdot \tau \cdot A_1}{N_c \cdot \Delta_1}, \quad (49)$$

где  $\Delta_1$  – плотность тока в обмотке статора, А/мм<sup>2</sup>.

Коэффициент  $k_{\text{ПК}}$  для синхронных двигателей принимают  $k_{\text{ПК}} = 0,25 \cdot 10^{-3} \div 0,35 \cdot 10^{-3}$ .

Диаметр стержня пусковой обмотки, мм:

$$d_c \approx 1,13 \cdot \sqrt{S'_c}. \quad (50)$$

Полученное по (50) значение округляют до 0,5 мм. Затем уточняют площадь поперечного сечения стержня, мм<sup>2</sup>:  $S_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}$ .

Длина стержня, мм:

$$l_{\text{ст}} = l_p + (0,2 \div 0,4) \cdot \tau, \quad (51)$$

где  $l_p$  – длина полюсного наконечника, мм.

Зубцовый шаг на полюсном наконечнике, мм:

$$t_2 = \frac{b_p - d_c - 2 \cdot e}{N_c - 1}, \quad (52)$$

где  $e$  – расстояние от края полюсного наконечника до первого паза, обычно  $e = 3 \div 10$  мм (рис. 11).

В целях уменьшения добавочных потерь в синхронных двигателях и исключения «прилипания» ротора к сердечнику статора зубцовый шаг  $t_2$  и число стержней  $N_c$  выбирают такими, чтобы соблюдались условия:

$$t_2 \geq 0,8 \cdot t_1; \quad (N_c - 1) \cdot \left[ 1 - \frac{t_2}{t_1} \right] > 0,75. \quad (53)$$

Исходя из этого, необходимо найденное по (52) значение зубцового шага проверить на соответствие указанным требованиям и в случае их невыполнения сделать пересчет, задавшись другими значениями  $N_c$  или  $z_1$ .

Пазы на роторе выбирают круглые полузакрытые.

Диаметр паза, мм:

$$d_{п2} = d_c + \Delta_{пр}, \quad (54)$$

где  $\Delta_{пр} = 0,2$  мм – припуск на штамповку и укладку стержней в пазы.

Ширина шлица паза  $b_{ш2} = 3 \div 4$  мм, а высота шлица паза  $h_{ш2} = 2 \div 3$  мм.

Короткозамыкающие сегменты выполняют из медных шин (прил. 3) сечением  $S_{к.з}$ , равным приблизительно половине суммарного сечения стержней одного полюса, мм<sup>2</sup>:

$$S_{к.з} = a_k \cdot b_k \approx 0,5 \cdot N_c \cdot S_c, \quad (55)$$

при этом толщина шины  $a_k$  должна быть не менее  $\frac{2 \cdot d_c}{3}$ .

## 7. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи выполняют с целью определения МДС обмотки возбуждения  $F_{об}$ , необходимой для создания магнитного потока машины  $\Phi$ , при холостом ходе. Требуемое значение магнитного потока в воздушном зазоре, Вб:

$$\Phi = \frac{E_{10}}{4 \cdot k_B \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}}, \quad (56)$$

где  $E_{10}$  – ЭДС фазы обмотки статора в режиме холостого хода, равная номинальному напряжению  $E_{10} = U_{ном}$ ;

$k_B$  – уточненное значение коэффициента формы поля, определяют по рис. 1 в зависимости от конструктивного коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha$ , принятого при расчете ширины полюсного наконечника  $b_p$ , см. (42).

Затем уточняют максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл:

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot 10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_i}, \quad (57)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициент полюсного перекрытия, определяемый по рис. 1, в зависимости от  $\alpha$ .

Расчет магнитной цепи ведут на пару полюсов и он заключается в определении магнитного напряжения отдельных участков магнит-

ной цепи. В явнополусной синхронной машине различают следующие участки магнитной цепи (рис. 14): воздушный зазор  $\delta$ , зубцовый слой статора  $h_{z1}$ , спинку статора  $l_{c1}$ , зубцовый слой ротора  $h_{c2}$ , полюс ротора  $h_m$ , обод ротора  $l_{об}$ , стык между полюсом и ободом  $h_{m об}$ .

#### **Магнитное напряжение воздушного зазора, А**

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot \delta_{cp} \cdot k_{\delta} \cdot 10^3, \quad (58)$$

где  $k_{\delta}$  – коэффициент воздушного зазора, учитывает влияние зубчатости статора и ротора на магнитное сопротивление воздушного зазора:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}. \quad (59)$$

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

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta_{cp}}{t_1 - b_{п1} + 10 \cdot \delta_{cp}}; \quad (60)$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2 + 10 \cdot \delta_{cp}}{t_2 - b_{ш2} + 10 \cdot \delta_{cp}}, \quad (61)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – зубцовые шаги статора и ротора;

$b_{п1}$  и  $b_{ш2}$  – ширина паза статора и шлица паза ротора; при полузакрытых пазах на статоре  $b_{п1}$  – ширина прорези паза.

#### **Магнитное напряжение зубцового слоя статора, А**

Для явнополусных синхронных машин для изготовления сердечника статора в настоящее время применяют холоднокатаные изотропные стали марок 2013, 2312, а для большой мощности – 2411.

При прямоугольных полуоткрытых и открытых пазах статора (рис. 6) находят ширину зуба в наиболее узком месте, мм:

$$b_{z1min} = t_1 - b_{п1}. \quad (62)$$

Магнитная индукция в минимальном сечении зуба равна, Тл:

$$B_{z1max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{k_{c1} \cdot b_{z1min}}, \quad (63)$$

где  $k_{c1} = 0,95$  – коэффициент заполнения пакета сталью.

Если по (63) величина  $B_{z1\max} \leq 1,8$  Тл, то расчет магнитного напряжения ведем по магнитной индукции в сечении зубца на высоте 1/3 от его наиболее узкого места, где ширина зубца равна, мм:

$$b_{z1(1/3)} = \frac{\pi \cdot [D_1 + (2/3) \cdot h_{z1}]}{z_1} - b_{п1}. \quad (64)$$

Магнитная индукция в сечении зубца  $b_{z1(1/3)}$ , Тл:

$$B_{z1(1/3)} = \frac{B_\delta \cdot t_1}{k_{c1} \cdot b_{z1(1/3)}}. \quad (65)$$

Напряженность  $H_{z1}$  определяют по основной кривой намагничивания для соответствующей марки стали (прил. 5–7).

Если же по (63) величина  $B_{z1\max} > 1,8$  Тл, то магнитную индукцию определяют в трех поперечных сечениях зубца: минимальном, шириной  $b_{z1\min}$ , максимальном

$$b_{z1\max} = t'_1 - b_{п1}, \quad (66)$$

и в среднем:

$$b_{z1\text{cp}} = 0,5 \cdot (b_{z1\max} + b_{z1\min}). \quad (67)$$

Максимальное зубцовое деление, мм:

$$t'_1 = \frac{(D_1 + 2 \cdot h_1) \cdot \pi}{z_1}. \quad (68)$$

Магнитная индукция в максимальном и среднем сечениях зубца, Тл:

$$B_{z1\min} = \frac{B_\delta \cdot t_1}{k_{c1} \cdot b_{z1\max}}; \quad (69)$$

$$B_{z1\text{cp}} = \frac{B_\delta \cdot t_1}{k_{c1} \cdot b_{z1\text{cp}}}. \quad (70)$$

Затем по кривым намагничивания для зубцов (прил. 9, 10) определяют напряженность поля  $H_{z1\max}$ ,  $H_{z1\min}$ ,  $H_{z1\text{cp}}$ , при этом расчет коэффициентов, учитывающих ответвление магнитного потока в паз ведут по формулам:

– для  $B_{z1\max}$ :

$$k_{п1\max} = \frac{t_1}{b_{z1\min} \cdot k_{c1}}; \quad (71)$$

– для  $B_{z1min}$ :

$$k_{п1min} = \frac{t'_1}{b_{z1max} \cdot k_{c1}}; \quad (72)$$

– для  $B_{z1cp}$ :

$$k_{п1cp} = 0,5 \cdot (k_{п1max} + k_{п1min}). \quad (73)$$

Расчетное значение напряженности поля в зубце статора, А/м:

$$H_{z1} = \frac{H_{z1max} + 4 \cdot H_{z1cp} + H_{z1min}}{6}. \quad (74)$$

Магнитное напряжение зубцового слоя статора определяют по формуле, А:

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3}, \quad (75)$$

где  $h_{z1}$  – высота зубца, мм.

#### **Магнитное напряжение зубцового слоя ротора, А**

Полюсы с полюсными наконечниками выполнены из конструкционной стали марки Ст3 толщиной 1 мм. Ширина зубца на расстоянии 1/3 от поверхности полюсного наконечника равно, мм:

$$b_{z2(1/3)} = \frac{D_1 - 2 \cdot \delta - (2/3) \cdot h_{z2}}{D_1 - 2 \cdot \delta} \cdot t_2 - 0,94 \cdot d_{п2}, \quad (76)$$

где  $d_{п2}$  – диаметр паза ротора, мм;

$h_{z2} = d_{п2} + h_{ш2}$  – высота зубца ротора, мм;

$h_{ш2}$  – высота шлица.

Магнитная индукция в зубце ротора:

$$B_{z2(1/3)} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_i}{k_{c2} \cdot b_{z2(1/3)} \cdot l_m}. \quad (77)$$

Напряженность поля в зубце ротора, при магнитной индукции  $B_{z2(1/3)}$ , определяется по приложению 8.

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора, А:

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot h_{z2} \cdot 10^{-3}. \quad (78)$$

### **Магнитное напряжение спинки статора, А**

Магнитная индукция в спинке статора определяется:

$$B_{cl} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_\delta}{k_{cl} \cdot h_{cl}}, \quad (79)$$

где  $h_{cl}$  – высота спинки статора, мм.

Напряженность поля в спинке статора при  $B_{cl}$  находится из приложения 5.

Длина средней силовой линии в спинке статора, мм:

$$L_{cl} = \frac{\pi}{2p} \cdot (D_{н1} - h_{cl}). \quad (80)$$

Магнитное напряжение спинки статора, А:

$$F_{cl} = \xi \cdot H_{cl} \cdot L_{cl} \cdot 10^{-3}, \quad (81)$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение магнитной индукции в спинке статора вдоль магнитной линии, берется из рис. 15.

Коэффициент магнитного насыщения сердечника статора и зубцового слоя ротора:

$$k_{\mu 1} = \frac{F_{\delta zc}}{2 \cdot F_\delta}, \quad (82)$$

$$\text{где } F_{\delta zc} = 2 \cdot F_\delta + 2 \cdot F_{z1} + 2 \cdot F_{z2} + F_{cl}. \quad (83)$$

### **Магнитное напряжение полюса**

Коэффициент рассеяния полюсов ротора определяется из выражения:

$$\sigma_m = \sigma'_m \cdot k_{\mu 1}, \quad (84)$$

где  $\sigma'_m$  – предварительное значение коэффициента рассеяния полюсов (41).

Магнитная индукция в основании полюса, Тл:

$$B_m = \frac{\Phi \cdot \sigma_m \cdot 10^6}{l'_m \cdot b_m \cdot k_{ст}}, \quad (85)$$

где  $b_m$  – ширина сердечника полюса, мм (40);

$k_{ст}$  – коэффициент заполнения сердечника полюса сталью.



Напряженность поля в полюсе при  $B_m$  находится по приложению 8.

Магнитное напряжение полюса:

$$F_m = H_m \cdot (h_m + h_p) \cdot 10^{-3}, \quad (86)$$

где  $H_m$  – напряженность поля у основания полюса, А/м.

### **Магнитное напряжение обода**

Магнитная индукция в ободке ротора:

$$B_{об} = \frac{\Phi \cdot \sigma_m \cdot 10^6}{2 \cdot l_{об} \cdot h_{об} \cdot k_{ст}}, \quad (87)$$

где  $l_{об}$  и  $h_{об}$  – соответственно длина и высота обода, мм, определяются по формулам (47) и (48).

Напряженность поля в ободке при  $B_{об}$  находится по приложению 8.  
Длина средней силовой линии в ободке:

$$L_{об} = \frac{\pi}{2p} \cdot [D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot (h_m + h_p) - h_{об}]. \quad (88)$$

Магнитное напряжение обода, А:

$$F_{об} = H_{об} \cdot L_{об} \cdot 10^{-3}. \quad (89)$$

### **Магнитное напряжение стыка между полюсом и ободом, А**

Магнитное напряжение стыка между полюсом и ободом определяют по приближенной формуле:

$$F_{mоб} \approx 250 \cdot B_m, \quad (90)$$

где  $B_m$  – магнитная индукция в основании полюса, Тл (85).

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения синхронного двигателя в режиме холостого хода на пару полюсов определяется суммой магнитных напряжений:

$$F_{ов} = 2 \cdot F_{\delta} + 2 \cdot F_{z1} + 2 \cdot F_{z2} + F_{c1} + 2 \cdot F_m + F_{об} + 2 \cdot F_{mоб}. \quad (91)$$

Задавшись рядом относительных значений ЭДС статора  $E_{10*} = \frac{E_{10}}{U_{1ном}}$ , например 0,5; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3 и, рассчитав для каждого из этих значений  $F_{ов*}$ , построим характеристику холостого хода син-

хронного двигателя в относительных единицах  $E_{10*} = f(F_{об*})$ . За базовое значение относительной МДС  $F_{об*}$  принята МДС, соответствующая ЭДС статора  $E_{10} = U_{1ном}$ .

Характеристику холостого хода машины  $E_{10*} = f(F_{об*})$  сравнивают с нормальной характеристикой холостого хода явнополюсных синхронных машин:

Таблица 11

$E_{10*}$	0,58	1,0	1,21	1,33	1,44	1,46	1,51
$E_{об*}$	0,50	1,0	1,50	2,0	2,50	3,0	3,50

Обе характеристики холостого хода, построенные в одних осях координат, должны мало отличаться друг от друга.

Для удобства расчета магнитной цепи следует составить таблицу.

## 8. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ СТАТОРА

Для построения векторных диаграмм, а также для расчета режима холостого хода, номинальных параметров и рабочих характеристик необходимо знать параметры обмотки статора.

Активное сопротивление обмотки статора, Ом, определяется:

$$r_1 = \rho_c \cdot \omega_1 \cdot l_{1cp} \cdot 10^3 / n_{эл} \cdot a_1 \cdot S_{1эл}, \quad (92)$$

где  $l_{1cp}$  – средняя длина витка обмотки статора,

$$l_{1cp} = 2 \cdot (l_1 + l_{1л}), \quad (93)$$

$l_{1л}$  – средняя длина лобовой части обмотки статора,

$$l_{1л} = \frac{t_1 \cdot y_1}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 3,5)/t_1]^2}} + h_{z1} + 50, \quad (94)$$

$\rho_c$  – удельное электрическое сопротивление меди при расчетной рабочей температуре, берется из таблицы 12.

Таблица 12

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

Известно, что с ростом температуры удельное сопротивление меди и алюминия увеличивается. В соответствии с ГОСТ 183-74 расчетная рабочая температура принимается равной 75 °С для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости *A*, *E*, *B* и 115 °С для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости *F* и *H*.

Расчет средней длины витка обмотки жестких катушек для высоковольтных машин (6 или 10 кВ) выполняют по (93), а затем увеличивают ее на 40 мм.

Активное сопротивление обмотки фазы статора в относительных единицах:

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}}, \quad (95)$$

где  $I_{1\text{НОМ}}$  и  $U_{1\text{НОМ}}$  – номинальные значения фазных тока и напряжения.

Проверка правильности определения  $r_{1*}$ :

$$r_{1*} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A_1 \cdot \Delta_1 \cdot l_{\text{ср1}}}{114 \cdot 10^4 \cdot m_1 \cdot U_{1\text{НОМ}} \cdot I_{1\text{НОМ}}}. \quad (96)$$

Формула (96) определяет  $r_{1*}$  при температуре 20 °С, поэтому  $r_{1*}$ , найденное по (95), также необходимо привести к температуре 20 °С.

$$r_{1*20^\circ\text{C}} = r_{1*75^\circ\text{C}} \cdot 0,82. \quad (97)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора  $X_1$  обусловлено полями рассеяния пазовой и лобовой частей обмотки, а также высшими гармониками поля в воздушном зазоре (дифференциальное рассеяние) и определяется по следующей формуле:

$$X_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot \omega_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} (\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}), \quad (98)$$

где  $\lambda_{\text{п1}}$ ,  $\lambda_{\text{д1}}$ ,  $\lambda_{\text{л1}}$  – соответственно, коэффициенты пазового, дифференциального и лобового рассеяния.

Коэффициент удельной проводимости паза  $\lambda_{\text{п1}}$  состоит из двух составляющих: одной пропорциональной проводимости между стенами паза,  $\lambda_{\text{п}}$  и другой – проводимости по коронкам зубцов  $\lambda_{\text{к}}$ ,

$$\lambda_{\text{п1}} = \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{к}}. \quad (99)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния между стенками паза при прямоугольном открытом пазах находится (рис. 16, в)

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{h_1 - h''}{3 \cdot b_{\text{пл}}} \cdot k_{\beta} + \frac{h_1 + h_{\text{к1}} + h_{\text{ш1}}}{b_{\text{пл}}} \cdot k'_{\beta} + \frac{h''_1}{4 \cdot b_{\text{пл}}}, \quad (100)$$

где  $h_1$  – размер обмотки, мм (рис. 16, в);

$k_{\beta}, k'_{\beta}$  – коэффициенты, определяемые по рис. 17.

Коэффициент  $\lambda_{\text{к}}$  определяют по формуле:

$$\lambda_{\text{к}} = [\alpha \cdot \lambda'_{\text{к}} + (0,22 + 0,32 \sqrt{\frac{t_1 - b_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}}}) (1 - \alpha)] k'_{\beta}, \quad (101)$$

где  $t_1$  – зубцовое деление статора;

$b_{\text{ш1}}$  – ширина шлица (при открытых пазах  $b_{\text{ш1}} = b_{\text{пл}}$ );

$\alpha = 0,71$  – коэффициент полюсного перекрытия;

$\lambda'_{\text{к}}$  – находится по рис. 18 в зависимости от отношения  $b_{\text{ш1}} / \delta_{\text{ср}} \cdot k_{\delta}$ .

При больших отношения  $b_{\text{ш1}} / \delta_{\text{ср}} \cdot k_{\delta}$  проводимость  $\lambda'_{\text{к}}$  может оказаться отрицательной (рис. 18), что приводит к уменьшению  $\lambda_{\text{п1}}$ . Это уменьшение связано с искривлением силовых линий поля рассеяния вблизи воздушного зазора по сравнению с прямолинейным законом их распределения, как это принято при выводе формулы для  $\lambda_{\text{п}}$ .

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния определяют по формуле:

$$\lambda_{\text{д1}} \approx 0,03 \cdot \tau \cdot \alpha_i / \delta_{\text{ср}} \cdot k_{\delta} \cdot q_1. \quad (102)$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора:

$$\lambda_{\text{л1}} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{\text{л1}} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau). \quad (103)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки статора, Ом:

$$X_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot \omega_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_1. \quad (104)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в относительных единицах:

$$X_{1*} = X_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}}. \quad (105)$$

Проверка правильности определения  $X_{1*}$ :

$$X_{1*} = \frac{0,39 \cdot D_1 \cdot A_1^2 \cdot l_1 \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-7}}{m_1 \cdot U_{1\text{ном}} \cdot I_{1\text{ном}} \cdot z_1}. \quad (105')$$

Индуктивное сопротивление взаимной индукции по продольной оси в относительных единицах:

$$X_{ad*} = k_{ad} \cdot F_{a\text{ном}}/2 \cdot k_{\mu 0,5} \cdot F_{\delta\text{ном}}, \quad (106)$$

где  $k_{ad}$  – коэффициент приведения МДС реакции якоря по продольной оси (по рис. 19);

$F_{a\text{ном}}$  – МДС обмотки статора (якоря) на пару полюсов, А, соответствующая номинальному току  $I_{1\text{ном}}$ :

$$F_{a\text{ном}} = \frac{0,9 \cdot m_1 \cdot I_{1\text{ном}} \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}}{p}, \quad (107)$$

где  $F_{\delta\text{ном}}$  – магнитное напряжение воздушного зазора при ЭДС

$$E_{10} = U_{1\text{ном}};$$

$k_{\mu 0,5}$  – коэффициент, учитывающий влияние магнитных напряжений стали и зазора между полюсом и ярмом для ненасыщенной машины; он может быть найден из расчета магнитной цепи при магнитном потоке, соответствующем ЭДС

$$E_{10} = 0,5 \cdot U_{1\text{ном}}.$$

$$k_{\mu 0,5} = \frac{F_{в.о.0,5}}{2 \cdot (F_{\delta 0,5} + F_{m,об.0,5})}, \quad (108)$$

где  $F_{в.о.0,5}$ ,  $F_{\delta 0,5}$ ,  $F_{m,об.0,5}$  – магнитные напряжения соответственно обмотки возбуждения, воздушного зазора, стыка между полюсом и ободом при ЭДС  $E_{10} = 0,5 \cdot U_{1\text{ном}}$  в режиме холостого хода.

Индуктивное сопротивление взаимной индукции по поперечной оси в относительных единицах:

$$X_{aq*} = \frac{k_{aq} \cdot F_{аном}}{2 \cdot k_{\mu 0,5} \cdot F_{\delta ном}} \cdot \frac{1 + k_{\delta}}{2}, \quad (109)$$

где  $k_{aq}$  – коэффициент приведения МДС реакции якоря по поперечной оси (по рис. 19);

$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}$  – коэффициент воздушного зазора.

Синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси (о. е.):

$$X_{d*} = X_{ad*} + X_{1*}. \quad (110)$$

Синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси (о. е.):

$$X_{q*} = X_{aq*} + X_{1*}. \quad (111)$$

## 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ (МДС) ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ

Магнитодвижущую силу обмотки возбуждения при нагрузке  $F_{в.ном}$  рассчитывают по векторной диаграмме, построенной по уравнению напряжения:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_{1н} + j \cdot I_1 \cdot X_1 + I_1 \cdot r_1, \quad (112)$$

где  $\underline{E}_{1н}$  – ЭДС синхронной машины при нагрузке, т. е. ЭДС, наведенная результирующим магнитным потоком (с учетом реакции якоря).

При построении векторной диаграммы целесообразно использовать относительные значения параметров тока, напряжения, ЭДС и МДС.

Для более точного определения потока рассеяния полюсов при нагрузке необходимо иметь частичные характеристики намагничивания:

$$\Phi_* = E_{10*} = f(F_{\delta зс*}), \quad \Phi_{m*} = f(F'_{p*}),$$

$$\Phi_{\delta*} = \Phi_{m*} - \Phi_* = f(F_{\delta зс*}).$$

$$\text{Здесь принято: } \Phi_* = \frac{\Phi}{\Phi_{н}}, \quad \Phi_{\delta*} = \frac{\Phi_{\delta}}{\Phi_{н}}, \quad \Phi_{m*} = \frac{\Phi_m}{\Phi_{н}},$$

где  $\Phi_{н}$  – базовое значение потока при номинальном фазном напряжении.

$$F_{\delta zc}^* = \frac{F_{\delta zc}}{F_{\text{в.о.ном}}}, \quad F'_{p^*} = \frac{F'_{1p}}{F_{\text{в.о.ном}}},$$

где  $F_{\text{в.о.ном}}$  – базовое значение МДС обмотки возбуждения при холостом ходе и номинальном фазном напряжении.

Для оценки насыщения машины необходимо построить зависимость  $E_* = f(k_{\mu 1})$  (рис. 33).

Указанные графики строятся по данным расчета магнитной цепи машины.

Рассмотрим порядок построения векторной диаграммы явнополюсной синхронной машины (рис. 20) и определения МДС обмотки возбуждения  $F_{\text{вн}}$  для номинального режима работы.

1. В соответствии с номинальными значениями тока статора  $I_{1\text{ном}}$  и фазного напряжения  $U_{1\text{ном}}$  выбираем масштабы тока  $m_i$ , А/мм и напряжения  $m_U$ , В/мм, учитывая угол фазового сдвига  $\varphi_{1\text{ном}}$  строят векторы  $I_{1\text{ном}}$  и  $U_{1\text{ном}}$ . Вектор тока опережает вектор напряжения на угол  $\varphi_{1\text{ном}}$ .

2. Из конца вектора  $U_{1\text{ном}}$  проводим вектор падения напряжения в активном сопротивлении  $I_{1\text{ном}} \cdot r_1$  (параллельно вектору тока) и из конца последнего – вектор падения напряжения в индуктивном сопротивлении  $j \cdot I_{1\text{ном}} \cdot X_1$  (перпендикулярно вектору тока). Как видно из выражения (112), для получения вектора ЭДС обмотки статора указанные падения напряжения берут со знаком минус, т. е. вычитают. В крупных машинах падение напряжения в активном сопротивлении относительно мало и им можно пренебречь.

3. Используя результаты расчета магнитной цепи строим график  $E_{10} = f(k_{\mu 1})$  (рис. 21), по которому для ЭДС  $E_{1н}$  определяем соответствующее значение коэффициента магнитного насыщения  $k_{\mu 1}$ , а затем по рис. 22 находим коэффициенты  $\chi_d, \chi_q, k$ . Если магнитная цепь машины не насыщена, то продольные и поперечные магнитные поля не оказывают взаимного влияния, т. е. действуют независимо. Но обычно магнитные цепи синхронных машин насыщены и взаимное влияние продольного и поперечного магнитных полей в нагруженной машине необходимо учитывать. Это достигается умножением МДС  $F_{ad}$  и  $F_{aq}$  соответственно на коэффициенты  $\chi_d, \chi_q$ :

$$F'_{ad} = F_{ad} \cdot \chi_d; \quad F'_{aq} = F_{aq} \cdot \chi_q. \quad (113)$$

Коэффициенты  $\bar{\chi}_d$  и  $\bar{\chi}_q$  относятся к машинам с равномерным воздушным зазором ( $\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1$ ), а коэффициенты  $\tilde{\chi}_d$  и  $\tilde{\chi}_q$  – к машинам с неравномерным зазором ( $\frac{\delta_{\max}}{\delta} = 1,5$ ), как в нашем случае.

4. По результатам расчета магнитной цепи строим график  $E_{10*} = f(F_{\delta_{zc}*})$  (рис. 23). Затем определяем МДС статора (якоря)  $F_{\text{аном}}$  по (107) и МДС статора (якоря) по поперечной оси с учетом магнитного насыщения

$$\frac{F_{aq*}}{\cos \psi_1} = \tilde{\chi}_q \cdot k_{ad} \cdot F_{\text{аном}*} \quad (114)$$

и по рис. 23, – соответствующую ей ЭДС. В относительных единицах  $\frac{E_{aq*}}{\cos \psi_1}$ . Затем вычисляем значение  $\frac{E_{aq}}{\cos \psi_1}$  в абсолютных единицах

$$\frac{E_{aq}}{\cos \psi_1} = \left( \frac{E_{aq*}}{\cos \psi_1} \right) \cdot U_{\text{ном}} \quad (115)$$

и суммируем вектор этой ЭДС с вектором падения напряжения в индуктивном сопротивлении, т. е. с вектором  $(-j \cdot I_{\text{ном}} \cdot X_1)$ . В результате на векторной диаграмме получаем точку  $Q$  (рис. 20). Соединив эту точку с точкой  $O$ , получаем прямую  $OQ$ , образующую с вектором тока  $I_{\text{ном}}$  угол  $\psi_1$ .

5. Опустив перпендикуляр из конца вектора  $(-j \cdot I_{\text{ном}} \cdot X_1)$  на линию  $OQ$ , находим векторы ЭДС:  $E_{ad}$  – ЭДС, наведенную результирующим магнитным потоком по продольной оси, и  $E_{aq}$  – ЭДС, наведенную результирующим магнитным потоком по поперечной оси.

6. Из графика  $E_{10*} = f(F_{\delta_{zc}*})$ , отложив по оси ординат значение  $E_{2d*}$ , получим на оси абсцисс МДС по продольной оси  $F_{2d*}$ .

7. Далее определяем МДС продольной реакции якоря с учетом размагничивающего действия МДС поперечной реакции якоря:

$$F''_{ad} = F_{\text{аном}*} (k_{ad} \cdot \chi_d \cdot \sin \psi_1 + \tilde{k} \cdot \frac{\tau}{\delta} \cdot \cos \psi_1). \quad (116)$$

8. Используя результаты расчета магнитной цепи, строим графики  $\Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta_{zc}*})$  и  $\Phi_{m*} = f(F_{p*})$  (рис. 23). Отложив на оси абс-



цисс сумму  $F_{2d*} + F''_{ad*}$  по характеристике  $\Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta zc*})$ , найдем поток рассеяния в основании полюса  $\Phi_{\sigma*}$ .

9. По потоку полюса  $\Phi_{m*} = \Phi_{2d*} + \Phi_{\sigma*}$  из характеристики  $\Phi_{m*} = f(F'_{p*})$  определим магнитное напряжение ротора при нагрузке  $F_{pH*}$ .

Находят МДС обмотки возбуждения при нагрузке в относительных единицах:

$$F_{вн*} = F_{2d*} + F''_{ad*} + F_{pH*}, \quad (117)$$

и в физических единицах, А

$$F_{вн} = F_{вн*} + F_{в.о.ном}. \quad (118)$$

## 10. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Для питания обмотки возбуждения в современных синхронных машинах применяют тиристорные возбудительные устройства. Технические данные некоторых из этих устройств приведены в таблице 13. Применение пониженного напряжения для питания обмотки возбуждения позволяет повысить ток возбуждения  $I_B$  и получить небольшое число витков в полюсной катушке при большом сечении проводника. Эта мера способствует лучшему заполнению катушек медью и более эффективному отводу теплоты от них.

Таблица 13

Технические данные тиристорных возбудителей

Тип возбудителя	Мощность, кВт	Номинальное напряжение, В
ТВУ-46-320	14,7	46
ТВУ-65-320	20,8	65
ТВУ-80-320	25,6	80
ТВУ-105-320	33,6	105
ТВУ-137-320	43,8	137
ТВУ-166-320	53,0	166
ТЕ-320-48Г	15,4	48
ТЕ-320-75	24,0	75
ТЕ-320-150	48,0	150

Примечание. Все устройства рассчитаны на номинальный ток 320 А.

У явнополюсных синхронных машин с  $h \leq 500$  мм питание системы возбуждения, как правило, осуществляется от дополнительных обмоток, закладываемых в те же пазы статора, где расположена основная обмотка [3].

Напряжение на обмотку возбуждения подают через контактные кольца и металлографические щетки марки МТ4. В связи с этим при нахождении напряжения должно быть учтено падение напряжения в щеточном контакте  $\Delta U_{щ} \approx 2$  В.

В синхронных машинах мощностью свыше 100 кВт получили применение однослойные катушки из неизолированной медной проволоки прямоугольного сечения от 30 до 300 мм<sup>2</sup>, намотанной на ребро. Изоляцию обмотки ротора выполняют по рис. 24 и таблице 14. Крайние витки катушки выполняют с усиленной изоляцией, толщиной  $\approx 2$  мм.

Проверка возможности размещения обмоток полюса в междуполюсном окне состоит в расчете размеров катушек по ширине и высоте с последующим вычерчиванием в масштабе эскиза междуполюсного окна.

В тех случаях, когда между соседними полюсами недостаточно места для размещения обмотки, однослойные катушки выполняют ступенчатыми из двух секций. Секцию катушки со стороны сердечника ротора выполняют из медной полосы меньшей ширины при равновеликой площади поперечного сечения проводника.

При определении размеров катушек следует иметь в виду, что при намотке и пропитке катушки разбухают. Это разбухание учитывают умножением высоты полюса на коэффициент 1,03.

Таблица 14

**Изоляция катушек явнополюсных синхронных машин мощностью свыше 100 кВт**

Позиция (на рис. 24)	Материал		Число слоев	Общая толщина, мм	Примечание
	Наименование	Толщина, мм			
1	Медь полосовая	—	—	—	—
2	Бумага асбестовая электроизоляционная	0,2	2	0,4	Для классов нагревостойкости <i>A, E, B</i> применяются лакировка глифталебакелиновым лаком, для классов <i>F</i> и <i>H</i> – лаком на кремнийорганической основе

Позиция (на рис. 24)	Материал		Число слоев	Общая толщина, мм	Примечание
	Наименование	Толщи- на, мм			
3	Миканит формовочный (или микафолий, или стекломикафолий)	0,5 (0,2)	3 8	1,5 (1,6)	Для обмоток в тропическом и химически стойком исполнениях применять только стекломикафолий или формовочный миканит
4, 6	Миканит прокладочный	0,5	1	0,5	Промежутки между шайбами и сердечником заполняются электроизоляционной замазкой
5	Стеклотекстолит	5	1	5	Для класса нагревостойкости А нормального исполнения вместо стеклотекстолита применяется гетинакс
7	То же	8	1	8	

Средняя длина витка полюсной катушки  $l_{в,ср}$  зависит от вида катушки.

Для однослойных катушек (рис. 25) с лобовой частью в виде полуокружности с радиусом  $R$  (рис. 26, а) (применяется при ширине сердечника полюса  $b_m \leq 200$  мм)

$$l_{в,ср} = 2 \cdot (l_m - 2 \cdot c) + \pi \cdot (b_m + 2 \cdot \delta_u + b'). \quad (119)$$

Расстояние  $c$  принимают в зависимости от ширины сердечника полюса:

Таблица 15

$b_m$ , мм	60	61–100	101–120	121–150	151–200
$c$ , мм	10	12,5	15	20	30

Для однослойных катушек (рис. 25) с лобовой частью, выполненной двумя закруглениями радиусом  $r \approx b'$  (рис. 26, б) (применяется при  $b_m > 200$  мм)  $l_{в,ср}$  равна:

$$l_{в,ср} = 2 \cdot (l_m - b_m - 2 \cdot r) + \pi \cdot (2 \cdot r + 2 \cdot \delta_u + b'). \quad (120)$$

В выражениях (119) и (120) предварительное значение ширины проводника  $b' \approx (0,05 \div 0,1) \tau$ , а односторонняя толщина изоляции между сердечником полюса и катушкой  $\delta_u$  принимается равной от 1,5 до 2 мм, в зависимости от конструкции изоляции полюсной катушки,  $\delta_u$  можно также выбрать из таблицы 13.

Предварительное сечение медной проволоки для катушки возбуждения, мм<sup>2</sup>:

$$S'_B = \frac{\rho'_c \cdot F'_{BH} \cdot p \cdot l_{B,CP} \cdot 10^3}{U_B}, \quad (121)$$

где  $F'_{BH} = (1,1 \div 1,2) F_{BH}$  – расчетное значение МДС обмотки возбуждения, А;

$\rho'_c$  – удельное сопротивление меди при рабочей температуре (для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости  $B$ , однослойной  $\rho_c = 25,6 \cdot 10^{-9}$  Ом · м);

$l_{B,CP}$  – средняя длина витка катушки, мм;

$U_B$  – напряжение непосредственно на обмотке возбуждения, В:

$$U_B = U_{B,НОМ} - 2. \quad (122)$$

Ток возбуждения при нагрузке, А:

$$I_{BH} = S'_B \cdot \Delta'_B, \quad (123)$$

где  $\Delta'_B$  – предварительное значение плотности тока в обмотке возбуждения, принимается в зависимости от вида катушек, при однослойных  $3,5 \div 5,3$  А/мм<sup>2</sup> (меньшие значения  $\Delta'_B$  соответствуют более длинным машинам).

Число витков катушки обмотки возбуждения (на полюс):

$$\omega_B = \frac{F_{BH}}{2 \cdot I_{BH}}. \quad (124)$$

Для выбора стандартной проволоки прямоугольного сечения сначала определяют меньший размер прямоугольной проволоки, мм:

$$a = \frac{h_m - \delta_\Pi}{\omega_B + 1} - \delta_a, \quad (125)$$

где  $h_m$  – высота сердечника полюса, мм;

$\delta_{\text{п}}$  – толщина прокладок на ободу и под полюсным наконечником, мм (табл. 14);

$\delta_a$  – толщина слоев асбестовой бумаги между двумя соседними витками катушки, мм (табл. 14).

Большой размер прямоугольной проволоки (ленты), мм:

$$b = \frac{S_{\text{в}}}{a}. \quad (126)$$

Затем по приложению 1 выбирают стандартную проволоку прямоугольного сечения или ленту. После этого выполняют в масштабе эскиз двух соседних полюсов с катушками (рис. 25). Расстояние  $x$  должно быть не менее 7 мм:

$$x = \frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_p - 2 \cdot h_m)}{2 \cdot p} - b_m - 2 \cdot \delta_u - 2 \cdot b. \quad (127)$$

Фактическая плотность тока в обмотке возбуждения не должна превышать допустимого значения,  $\text{А/мм}^2$

$$\Delta_{\text{в}} = \frac{I_{\text{вн}}}{S_{\text{в}}}. \quad (128)$$

Далее рассчитывается превышение температуры обмотки возбуждения [2]:

$$\Delta\Theta_{\text{в}} = \frac{0,3 \cdot (2,8 + \frac{l_1}{\tau}) \cdot b \cdot \Delta_{\text{в}}^2}{1,6 + \sqrt{\vartheta_2}}, \quad (129)$$

где  $\vartheta_2$  – окружная скорость ротора, м/с,

$$\vartheta_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n_1}{60 \cdot 10^3}. \quad (130)$$

Полученное по (130) значение  $\Delta\Theta_{\text{в}}$  должно быть меньше допустимого на 10–15 °С.

Согласно ГОСТ 183-74 допустимое превышение температуры для однорядных обмоток с оголенными поверхностями при изоляции класса нагревостойкости  $B$  равно 90 °С, при изоляции класса  $F$  – 110 °С.

Если превышение температуры получится больше или, наоборот, много меньше допустимого, то необходимо произвести пересчет

обмотки возбуждения, что может потребоваться и в том случае, если расстояние  $x$  будет мало.

При пересчете можно попытаться изменить некоторые из рекомендуемых величин [2]: плотность тока в обмотках, соотношения между сторонами прямоугольного проводника, высоты и в небольших пределах (3–6 %) ширины полюсного сердечника сечения проводника за счет изменения напряжения, подводимого к обмотке возбуждения, воздушного зазора.

Затем уточняют высоту полюса, мм:

$$h_m = (a + \delta_a)(\omega_b + 1) + \delta_{\text{п}}. \quad (131)$$

Если полученное значение высоты полюса отличается от предварительно принятого более чем на 5 %, то следует пересчитать магнитное напряжение полюса ротора.

Активное сопротивление обмотки возбуждения при расчетной температуре, Ом:

$$r_{\text{в}\Theta} = \rho_{\text{с}\Theta} \cdot \frac{2 \cdot p \cdot \omega_{\text{кв}} \cdot l_{\text{в.ср}} \cdot 10^3}{S_{\text{в}}}. \quad (132)$$

Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке:

$$U'_{\text{вн}} = r_{\text{в}\Theta} \cdot I_{\text{вн}}. \quad (133)$$

Коэффициент запаса возбуждения:

$$k_3 = \frac{U_{\text{вн}}}{U'_{\text{вн}} + \Delta U_{\text{щ}}}. \quad (134)$$

Коэффициент запаса должен находиться в пределах  $k_3 = 1,1 \div 1,2$ .

## 11. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТОК И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ

Под параметрами обмоток синхронных машин обычно понимают их активные и индуктивные сопротивления, выраженные в физических или относительных единицах.

Определение активных и индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора необходимо для расчета номинальных параметров и рабочих характеристик синхронной машины в установившихся симметричных и несимметричных режимах, а также переходных процес-

сах. В разделе 8 были определены параметры обмотки статора. Здесь даются расчетные формулы для нахождения параметров обмотки возбуждения и демпферной (пусковой) обмотки. Приведенные ниже формулы дают значения параметров в относительных единицах. Параметры цепей ротора приведены к числу витков обмотки статора.

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения:

$$X_{в*} = 1,27 \cdot k_{ad} \cdot X_{ad*} \cdot \left( 1 + \frac{4 \cdot k_{\mu 0,5} \cdot F_{\delta} \cdot l'_m \cdot \sum \lambda}{\Phi_{\delta}} \right), \quad (135)$$

где  $l'_m$  – расчетная длина сердечника полюса по (43);

$F_{\delta}$ ,  $\Phi_{\delta}$  – магнитное напряжение воздушного зазора и поток при  $E_{10} = U_{1нф}$ ;

$$\sum \lambda = \lambda_{pl} + \frac{\lambda_{ml}}{1,53} + \frac{\lambda_{mv}}{2,65}, \quad (136)$$

$$\lambda_{ml} = \frac{0,55 \cdot h_m \cdot 10^{-6}}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2 \cdot p} \cdot (h_m + 2 \cdot h_p + 2 \cdot \delta)}, \quad (137)$$

$$\lambda_{pl} = (1,4 \cdot \left( \frac{d_t}{a'_p} - 0,25 \right) + 0,55 \cdot \left( \frac{c_p}{a'_p} + 0,2 \right) - 0,4 \cdot \left( \frac{c_p}{a'_p} - 0,5 \right)^2) \cdot 10^{-6}. \quad (138)$$

Здесь принято:  $c_p = \frac{(b_p - b_m)}{2}$ ,  $a'_p = \tau - b_p - \frac{\pi \cdot d_t}{p}$ ,

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4 \cdot D_1},$$

$$\lambda_{mv} = 0,37 \cdot \frac{b_m}{l'_m} \cdot 10^{-6}; \quad (139)$$

$\lambda_{ml}$  – удельная магнитная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями сердечников полюсов;

$\lambda_{pl}$  – удельная магнитная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями полюсных наконечников;

$\lambda_{mv}$  – удельная магнитная проводимость между торцевыми поверхностями;

$\lambda_{m\delta} = \lambda_{ml} + \lambda_{pl} + \lambda_{mv}$  – удельная магнитная проводимость для потока рассеяния на один полюс.

При расчете магнитной цепи поток рассеяния  $\Phi_{\sigma}$  был учтен введением коэффициента рассеяния  $\delta_m$ . Этот поток можно определить и по следующему выражению:

$$\Phi_{\sigma} = \frac{4 \cdot \lambda_{m\delta} \cdot l'_m \cdot F_{\delta zc}}{2}. \quad (140)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения:

$$X_{B\delta^*} = X_{B^*} - X_{ad^*}. \quad (141)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси:

$$X_{kd^*} = 7,9 \cdot \frac{F_{ан}}{2 \cdot \Phi_H} \cdot \frac{10^{-9}}{1 - k_{\delta}} \cdot \left( \frac{l_p}{N_c} \cdot (\lambda_{\delta} + \lambda_{ду}) + \lambda_{rd} \right), \quad (142)$$

где  $F_{ан}$  – МДС статора при номинальном токе;

$N_c$  – число стержней на полюс;

$\lambda_{\delta}$  – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния (при круглых полуоткрытых пазах (рис. 13)):

$$\lambda_{\delta} = \left( 0,785 - \frac{b_{ш2}}{2 \cdot d_{п2}} \right) + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}; \quad (143)$$

$\lambda_{ду}$  – коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния:

$$\lambda_{ду} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta_{cp} \cdot k_{\delta}}, \quad (144)$$

$\delta_{cp}$  – среднее значение воздушного зазора (39);

$k_{\delta}$  – коэффициент воздушного зазора (59);

$\lambda_{rd}$  – коэффициент проводимости короткозамыкающих колец по продольной оси

$$\lambda_{rd} = \frac{0,19 \cdot \tau \cdot C_d}{N_c}; \quad (145)$$



$C_d$  – коэффициент приведения, находят по рис. 27;

$k_\delta$  – коэффициент распределения демпферной обмотки (по рис. 28).

Индуктивное сопротивление рассеяния демпферной обмотки по поперечной оси:

$$X_{kq*} = 7,9 \cdot \frac{F_{ан}}{2 \cdot \Phi_H} \cdot \frac{10^{-6}}{1 + k_\delta} \cdot \left( \frac{l_p}{N_c} \cdot (\lambda_\delta + \lambda_{ду}) + \lambda_{rq} \right), \quad (146)$$

где  $\lambda_{rq}$  – коэффициент проводимости короткозамкнутых колец по поперечной оси:

$$\lambda_{rq} = \frac{0,19 \cdot \tau \cdot C_q}{N_c}. \quad (147)$$

Коэффициент  $C_q$  находят по рис. 27.

Активное сопротивление обмотки возбуждения, приведенной к обмотке статора, при рабочей температуре 75 °С, соответствующей принятому классу нагревостойкости изоляции (о. е.):

$$r_{в*} = \frac{0,44 \cdot F_{ан} \cdot k_{ад}^2 \cdot l_{вср}}{2 \cdot 10^8 \cdot \Phi_\delta \cdot f \cdot \omega_B \cdot S_B}. \quad (148)$$

Активное сопротивление демпферной обмотки при равномерном распределении стержней по продольной оси при  $\Theta = 75$  °С:

$$r_{kd*} = \frac{2,16}{10^8} \cdot \frac{F_{ан}}{2 \cdot f \cdot \Phi_\delta} \cdot \frac{1}{1 - k_\delta} \cdot \left( \frac{c_c \cdot l_c}{S_c \cdot N_c} + \frac{c_{кз} \cdot \tau \cdot C_d}{S_{кз} \cdot N_c} \right), \quad (149)$$

где  $l_c$  – длина стержня, мм, по (51);

$C_d$  – коэффициент приведения по рис. 27;

$c_c$  и  $c_{кз}$  – отношения удельных сопротивлений материала стержня и кольца к удельному сопротивлению меди (для меди эти коэффициенты равны 1, для латуни 4, для фосфористой бронзы 6,5).

Активное сопротивление демпферной (пусковой) обмотки по поперечной оси:

$$r_{kq*} = \frac{2,16}{10^8} \cdot \frac{F_{ан}}{2 \cdot f \cdot \Phi_\delta} \cdot \frac{1}{1 + k_\delta} \cdot \left( \frac{c_c \cdot l_c}{S_c \cdot N_c} + \frac{c_{кз} \cdot \tau \cdot C_d}{S_{кз} \cdot N_c} \right), \quad (150)$$

где  $S_{кз}$  – сечение короткозамыкающего сегмента (см. раздел 6).

Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси:

$$X'_{d*} = X_{1*} + \frac{X_{ad*} \cdot X_{в\sigma*}}{X_{ad*} + X_{в\sigma*}}, \quad (151)$$

где  $X_{1*}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в относительных единицах.

Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси:

$$X'_{q*} = X_{q*}. \quad (152)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора – по продольной оси:

$$X''_{d*} = X_{1*} + \frac{X_{kd*} \cdot (X'_{d*} - X_{1*})}{X_{kd} + X'_{d} - X_{1*}}, \quad (153)$$

– по поперечной оси:

$$X''_{q*} = X_{1*} + \frac{X_{aq*} \cdot X_{kq*}}{X_{aq*} + X_{kq*}}. \quad (154)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора для токов обратной последовательности при работе машины на малое внешнее сопротивление (короткое замыкание):

$$X_{2*} = \sqrt{X''_{d*} \cdot X''_{q*}}. \quad (155)$$

Постоянная времени представляет собой отношение индуктивности данной обмотки к ее омическому сопротивлению. От постоянной времени зависит продолжительность протекания переходных процессов в синхронной машине.

Постоянная времени, сек, обмотки возбуждения при разомкнутых обмотках статора и демпферной:

$$T_{d0} = \frac{X_{в*}}{\omega \cdot r_{в*}}, \quad (156)$$

где  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

Постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутой обмотке статора:

$$T'_d = T_{d0} \cdot \frac{X'_{d*}}{X_{d*}}. \quad (157)$$

Постоянные времени демпферной обмотки при разомкнутых обмотках статора и возбуждения:

– по продольной оси:

$$T_{kd0} = \frac{X_{ad*} + X_{kd*}}{\omega \cdot r_{kd*}}, \quad (158)$$

– по поперечной оси:

$$T_{kq0} = \frac{X_{aq*} + X_{kq*}}{\omega \cdot r_{kq*}}. \quad (159)$$

Постоянная времени пусковой обмотки по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке возбуждения и разомкнутой обмотке статора:

$$T''_{kdb} = \frac{X_{kd*} \cdot X_{b\delta*} + X_{ad*} \cdot X_{kd*} + X_{b\delta*} \cdot X_{ad*}}{\omega \cdot r_{kd*} \cdot (X_{b\delta*} + X_{ad*})}. \quad (160)$$

Постоянная времени пусковой обмотки по продольной оси при замкнутых накоротко обмотке возбуждения и обмотке статора:

$$T''_{kd} = T''_{kdb} \cdot \frac{X''_{d*}}{X_{d*}}. \quad (161)$$

Постоянная времени пусковой (демпферной) обмотки по поперечной оси полюсов при замкнутой накоротко обмотке статора:

$$T''_{kq} = T_{kq0} \cdot \frac{X''_{q*}}{X_{q*}}. \quad (162)$$

Постоянная времени обмотки статора при короткозамкнутых обмотках ротора:

$$T_a = \frac{X_{2*}}{\omega \cdot r_{1*}}. \quad (163)$$

Результаты расчетов представлены в таблицах 16 и 17.

Таблица 16

**Параметры явнополюсных синхронных двигателей  
в относительных единицах**

$X_{1*}$	$r_{1*}$	$X_{d*}$	$X_{q*}$	$X'_{d*}$	$X''_{d*}$	$X''_{q*}$	$X_{2*}$
0,1÷0,2	0,008÷0,02	1÷2,4	0,6÷1,6	0,2÷0,6	0,15÷0,3	0,15÷0,4	0,02÷0,2

Таблица 17

**Постоянные времени явнополюсных синхронных двигателей, с**

$T_{d0}$	$T'_d$	$T''_{kdв}$	$T_a$	$T''_{kd}$	$T''_{kq}$
1÷10	0,2÷2,5	0,01÷0,08	0,01÷0,5	0,01÷0,08	0,01÷0,05

## 12. МАССА АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для оценки массогабаритных параметров, для расчета потерь возникает необходимость в определении массы активных материалов.

При определении массы активных материалов необходимые для расчета размеры берут в метрах.

Масса зубцов статора, кг:

$$m_{z1} = 7800 \cdot l_i \cdot k_{cl} \cdot h_{п1} \cdot b_{z1/2} \cdot z_1, \quad (164)$$

где  $l_i$  – расчетная длина сердечника;

$k_{cl} = 0,95$  – коэффициент заполнения пакета;

$h_{п1}$  – высота паза статора;

$$b_{z1/2} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{п1})}{z_1} - b_{п1};$$

$b_{п1}$  – ширина паза;

$D_1$  – внутренний диаметр статора.

Масса ярма магнитопровода статора, кг:

$$m_{a1} = 7800 \cdot l_i \cdot k_c \cdot \pi \cdot (D_{1н} - h_c) \cdot h_c, \quad (165)$$

где  $h_c = \frac{(D_{1н} - D_1)}{2} - h_{п1}$  – высота спинки статора, м;

$D_{1н}$  – внешний диаметр статора.

Масса стали полюсов, кг:

$$m_m = 7800 \cdot l'_m \cdot k_{cp} \cdot 2 \cdot p \cdot (h_m \cdot b_m + 0,8 \cdot h_p \cdot b_p), \quad (166)$$

где  $l'_m$  – расчетная длина сердечника полюса;

$k_{cp}$  – коэффициент заполнения полюса сталью (принимают при толщине листа 1 мм – 0,95, при толщине 1,5 мм – 0,97).

Масса стали обода ротора, кг:

$$m_{об} = 7800 \cdot l_{об} \cdot \pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{mp} - h_{об}) \cdot h_{об}, \quad (167)$$

где  $h_{mp} = h_m + h_p$  – расчетная длина силовой линии в полюсе, м;

$l_{об}$  – длина обода;

$h_{об}$  – высота обода.

Масса меди обмотки статора, кг:

$$m_{м1} = \frac{8900 \cdot S_{1эф} \cdot u_{п} \cdot z_1 \cdot l_{1cp}}{2}, \quad (168)$$

где  $u_{п}$  – число эффективных проводников в пазу статора;

$S_{1эф}$  – определяется по (26);

$l_{1cp} = 2(l_1 + l_{л})$  – средняя длина витка обмотки статора.

Масса меди обмотки возбуждения, кг:

$$m_{мв} = 8900 \cdot S_{в} \cdot l_{в,ср} \cdot 2 \cdot p \cdot \omega_{в}, \quad (169)$$

где  $l_{в,ср}$  – средняя длина витка катушки.

Масса меди стержней демпферной (пусковой) обмотки, кг:

$$m_{мс} = 8900 \cdot S_c \cdot 2 \cdot p \cdot N_c \cdot l_c. \quad (170)$$

Масса меди короткозамыкающих колец, кг:

$$m_{мкз} = 8900 \cdot S_{кз} \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{ш2} - 2 \cdot d_{п2}) \cdot 2 \cdot \pi, \quad (171)$$

где  $h_{ш2}$  – высота шлица паза;

$d_{п2} = d_c + \Delta_{пр}$ ;

$\Delta_{пр} = 0,2$  мм – припуск на штамповку и укладку стержней в пазы.

По этим данным находят общие затраты активной стали и меди в двигателе:

$$m_{ст} = m_{z1} + m_{a1} + m_m + m_{об}. \quad (172)$$

Полная масса меди:

$$m_M = m_{м1} + m_{мв} + m_{мс} + m_{мкз}. \quad (173)$$

### 13. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Потери в синхронном двигателе можно разделить на основные и добавочные.

Основные потери слагаются из электрических потерь в обмотке статора, потерь на возбуждение, основных магнитных потерь и механических потерь.

Электрические потери в обмотке статора, Вт:

$$P_{\text{э1}} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1, \quad (174)$$

где  $r_1$  – активное сопротивление одной фазы обмотки статора, Ом, при расчетной рабочей температуре (92).

Потери на возбуждение, Вт,

$$P_{\text{в}} = I_{\text{вн}}^2 \cdot r_{\text{в}} + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{вн}}, \quad (175)$$

где  $r_{\text{в}}$  – сопротивление обмотки возбуждения при расчетной рабочей температуре  $\Theta = 75$  °С, Ом, (132);

$\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В – падение напряжения в щеточном контакте.

Сопротивления обмоток  $r_1$  и  $r_{\text{в}}$  соответственно приводят к расчетной рабочей температуре, равной 75 °С для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости *B* или 115 °С для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости *F* и *H*.

Магнитные потери в ярме магнитопровода, Вт:

$$P_{\text{с1}} = k_{da} \cdot p_{\text{с1}/50} \cdot B_{\text{с1}}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{\text{с1}}. \quad (176)$$

Магнитные потери в зубцах магнитопровода статора, Вт:

$$P_{\text{z1}} = k_{dz} \cdot p_{\text{z1}/50} \cdot B_{\text{z1}/3}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{\text{z1}}, \quad (177)$$

где  $p_{\text{с1}/50}$  и  $p_{\text{z1}/50}$  – удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, которые следует взять из приложения 10 для соответствующей марки стали;

$k_{da}$  и  $k_{dz}$  – коэффициенты, учитывающие увеличение потерь из-за частичного замыкания листов вследствие наличия заусенцев, а также изменения структуры стали при штамповке (при  $P_{\text{н}} > 100$  кВт,  $k_{da} = 1,3$ ,  $k_{dz} = 1,7$ );

$B_{c1}$  и  $B_{z1/3}$  – индукция в ярме статора и зубце статора на 1/3 высоты зубца при  $E_{10} = U_{\text{ном}}$  ( $E_* = 1$ , см. расчет характеристик холостого хода).

Механические потери, равные сумме потерь на трение в подшипниках, в контактом узле (трение щеток о контактные кольца) и потерь на вентиляцию, Вт:

$$P_{\text{мех}} \approx 3,68 \cdot p \cdot \left( \frac{\vartheta_2}{40} \right)^3 \cdot \sqrt{l_1}, \quad (178)$$

где  $\vartheta_2$  – окружная скорость ротора, м/с;

$l_1$  – полная длина сердечника статора, м.

Добавочные потери разделяют на добавочные потери холостого хода и добавочные потери при нагрузке.

Добавочные потери холостого хода обусловлены в основном поверхностными потерями в полюсных наконечниках. Они вызваны изменением магнитной индукции из-за зубчатости внутренней поверхности сердечника статора и определяются выражением, Вт:

$$P_{\text{п}} = k_{\text{п}} \cdot p \cdot b_p \cdot l_1 \cdot (z_1 \cdot n_1 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot (B_{\text{дном}} \cdot (k_{\delta 1} - 1) \cdot t_1)^2 \cdot 10^{-6}, \quad (179)$$

где  $B_{\text{дном}}$  – магнитная индукция в зазоре, Тл, соответствующая ЭДС  $E_{10} = U_{\text{ном}}$ ;

$k_{\text{п}}$  – коэффициент, определяемый толщиной листов полюсных наконечников: при толщине 1 мм –  $k_{\text{п}} = 4,6$ ; 2 мм –  $k_{\text{п}} = 8,6$ ; при массивных полюсных наконечниках  $k_{\text{п}} = 23,3$ ;

$b_p, l_1, t_1$  принимаются в миллиметрах;

$z_1$  – число зубцов статора.

Добавочные потери при нагрузке  $P_{\text{доб}}$  – это потери в обмотке статора от вихревых токов, потери в стали статора и полюсных наконечников ротора от высших гармоник магнитного поля. Добавочные потери при нагрузке в синхронных двигателях определяют ориентировочно в процентах подводимой мощности. Согласно ГОСТ 183-74 значение этих потерь принимают для машины мощностью до 1000 кВА 0,5 %, свыше 1000 кВА 0,25–0,4 %.

Суммарные потери в синхронном двигателе, кВт:

$$\sum P = (P_{\text{эл}} + P_{\text{в}} + P_{\text{с1}} + P_{\text{з1}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{п}} + P_{\text{доб}}) \cdot 10^{-3}. \quad (180)$$

Коэффициент полезного действия синхронного двигателя:

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_{\text{ном}}}, \quad (181)$$

где  $P_{\text{ном}} = m \cdot U_{\text{нф}} \cdot I_{\text{н}} \cdot \cos \varphi$  – мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке, кВт.

#### 14. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

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

$$\Delta \Theta_{\text{пов1}} = \frac{P_{\text{эл}} \cdot (2 \cdot l_1 / l_{\text{ср1}}) + P_{\text{м1}}}{\pi \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \alpha_1 \cdot (1 + 0,1 \cdot \vartheta_2)}, \quad (182)$$

где  $\vartheta_2$  – окружная скорость ротора, м/с;

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника статора, принимается в зависимости от отношения  $l_1 / \tau$ :

Таблица 18

$l_1 / \tau$	2	2,1 ÷ 4,0	4,1 ÷ 5,0
$\alpha_1$ Вт/(мм <sup>2</sup> · °С)	$8 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-5}$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора  $\Delta \Theta_{\text{из}}$  определяют по формуле (31).

Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С:

$$\Delta \Theta_{\text{л1}} = \frac{A_1 \cdot \Delta_1 \cdot t_1 \cdot \rho_c \cdot 10^6}{13,3 \cdot (1 + 0,07 \cdot \vartheta_2) \cdot \Pi_{\text{л1}}}, \quad (183)$$

где  $A_1$  – линейная нагрузка, А/м;

$\Delta_1$  – плотность тока в обмотке статора, А/мм<sup>2</sup>;

$\Pi_{\text{л1}} \approx 2 \cdot (h_{\text{пл}} + b_{\text{пл}})$  – периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки обмотки статора;

$\rho_c$  – удельное электрическое сопротивление меди, Ом · м, при расчетной температуре  $\Theta = 75$  °С.



Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды, °С:

$$\Theta_1 = \frac{((\Delta\Theta_{\text{изл}} + \Delta\Theta_{\text{повл}}) \cdot l_1 + (\Delta\Theta_{\text{изл}} + \Delta\Theta_{\text{пл}}) \cdot l_{1л}) \cdot 2}{l_{1\text{ср}}}. \quad (184)$$

## 15. ХАРАКТЕРИСТИКИ синхронного ДВИГАТЕЛЯ

Рабочие свойства синхронных двигателей определяются его характеристиками, а именно U-образной, угловой и рабочими. Для построения указанных характеристик используют векторные диаграммы.

U-образные характеристики  $I_{1*} = f(I_{в*})$  при  $P_1 = m \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cdot \cos\varphi = \text{const}$  (рис. 29) можно получить путем построения ряда векторных диаграмм при  $U_{1*} = 1 = \text{const}$  и  $I_{1*} \cdot \cos\varphi = \text{const}$  (рис. 30). Из построенных векторных диаграмм для каждого значения тока  $I_{1*}$  определяют ток возбуждения  $I_{в*}$ .

Угловые характеристики дают зависимость активной мощности от  $\Theta$  (угла нагрузки):  $P_1 = f(\Theta)$  при  $U_{1*} = 1$  и  $E'_{10*} = \text{const}$ . Угол  $\Theta$  является углом между осью полюсов и осью результирующего магнитного поля или между векторами ЭДС  $E'_{1н*}$  и напряжения  $U_{1н*}$ . Построение угловых характеристик с учетом насыщения машины связано с большими трудностями. Поэтому расчет этой характеристики осуществляется без учета насыщения. Параметры в этом случае принимают постоянными, равными их значению для ненасыщенной машины. Приблизительно, принимая параметры синхронного двигателя постоянными, угловую характеристику можно построить, задаваясь значениями угла  $\Theta = 0 \div \pi$  при  $U_{1*} = 1$  по уравнению:

$$M_* = \frac{E'_{10*}}{X_{d*}} \cdot \sin\Theta + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_{q*}} - \frac{1}{X_{d*}} \right) \cdot \sin 2\Theta. \quad (185)$$

При этом ЭДС  $E'_{10*}$  определяют по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода при токе возбуждения  $I_{вн*}$  (МДС  $F_{вн*}$ ).

По угловой характеристике определяют статическую перегружаемость синхронного двигателя. Под статической перегружаемо-

стью понимают отношение максимального вращающего момента к номинальному. В соответствии с ГОСТ 183-74 этот показатель для синхронных двигателей при  $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,9$  должен быть не менее 1,65.

Если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора и насыщением машины, что представляется допустимым для рассматриваемых синхронных двигателей серий СД2 и СДН2, то статическую перегружаемость можно определить, пользуясь соотношением:

$$\frac{P_{\text{max}^*}}{P_{\text{н}^*}} = \frac{M_{\text{max}^*}}{M_{\text{н}^*}}, \quad (186)$$

или

$$\frac{P_{\text{max}^*}}{P_{\text{н}^*}} = \frac{M_{\text{max}^*}}{M_{\text{н}^*}} = \frac{E'_{10^*}}{X_{d^*} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}} \cdot k_{\text{pc}}, \quad (187)$$

где  $k_{\text{pc}}$  – коэффициент, учитывающий влияние реактивной мощности, связанной с различием индуктивных сопротивлений  $X_d$  и  $X_q$ , берет-

ся по рис. 31 в зависимости от отношения  $\frac{X_{d^*} - X_{q^*}}{E'_{10^*} \cdot X_{q^*}}$ .

Рабочие характеристики двигателя, т. е. зависимости  $P_1^*$ ,  $I_1^*$ ,  $\cos \varphi$ ,  $\eta$  и  $M_*$  от полезной мощности  $P_2$  при  $U_{1^*} = 1 = \text{const}$  и  $I_{\text{вн}^*} = \text{const}$  можно получить, пользуясь U-образными характеристиками, построенными для ряда значений мощности  $P_1^*$ , из которых при  $I_{\text{в}} = I_{\text{вн}}$  находят значения тока  $I_1$ , а затем определяют  $\cos \varphi = \frac{P_1}{m_1 \cdot U_1 \cdot I_1}$ ;  $P_2 = P_1 - \sum P$  ( $\sum P$  – потери в машине для данного

режима работы),  $\eta = P_2 / P_1$ ,  $M = P_2 / \omega_{\text{н}}$  ( $\omega_{\text{н}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{н}}}{60}$ ).

Пусковые свойства синхронного двигателя характеризуются начальным пусковым моментом (при  $s = 1$ ), входным моментом (при  $s = 0,05$ ) и начальным пусковым током статора. У серийных двигателей, выпускаемых промышленностью в настоящее время, эти значения находятся в следующих пределах:

$$M_{\text{п}^*} = 0,8 \div 1,3; \quad M_{\text{вх}^*} = 0,9 \div 1,9; \quad I_{\text{п}^*} = 4,5 \div 6,5.$$

Эти показатели зависят от выбора конструктивных параметров и материала пусковой обмотки. Увеличение, например, сопротивления пусковой клетки путем замены меди латунью приводит к повышению начального пускового момента и некоторому снижению входного момента.

В соответствии с ГОСТ 18200-79Е синхронные двигатели должны допускать прямой асинхронный пуск при номинальном напряжении сети. При этом отношение начального пускового момента к номинальному не должно быть меньше 0,8, а отношение начального пускового тока к номинальному не должно превышать 6,5.

Точный расчет пусковых характеристик связан со значительными трудностями, поэтому на практике применяют упрощенные методы, позволяющие получить приемлемые по точности результаты. Расчеты выполняют в относительных единицах с использованием комплексных чисел (для упрощения «звездочка» в формулах обычно применяемая для обозначения относительных величин опущена).

Оценку пусковых свойств двигателя осуществляют по пусковым характеристикам, т. е. зависимостям  $I_{1*} = f(s)$  и  $M_* = f(s)$ . Наибольший интерес на этих характеристиках представляют величины, соответствующие  $s = 1$  (начальный пусковой ток и начальный пусковой момент), а также момент при скольжении  $s = 0,05$  (входной момент в синхронизм  $M_{вх*}$ ).

При расчете пусковых характеристик необходимо учитывать, что ротор синхронного двигателя имеет как магнитную, так и электрическую несимметрию. Необходимо также учитывать, что  $X_d \neq X_q$ .

На основании сказанного полное сопротивление по продольной оси машины в зависимости от скольжения  $s$  равно:

$$\underline{Z}_{ds} = jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{jX_{ad}} + \frac{1}{\frac{r'_B}{s} + jX_{в\delta}} + \frac{1}{\frac{r_{kd}}{s} + jX_{kd}}}}, \quad (188)$$

где  $r'_B \approx (10 \div 12) \cdot r_B$ ,  $r_B$  определяют по (148).

Полное сопротивление по поперечной оси:

$$\underline{Z}_{qs} = jX_1 + \frac{1}{\frac{1}{jX_{ad}} + \frac{1}{\frac{r_{kd}}{s} + jX_{kd}}}. \quad (189)$$

Вследствие магнитной и электрической несимметрии машины в статоре помимо тока  $I'$  основной частоты  $f_1$  протекает ток  $I''$  частоты  $(2s - 1)$ . Значения их могут быть найдены по формулам:

$$\underline{I}'_1 = \frac{\underline{U} \cdot (\underline{Z}_{ds} + \underline{Z}_{qs} + \frac{2 \cdot r_1}{2 \cdot s - 1})}{(\underline{Z}_{ds} + r_1) \cdot (\underline{Z}_{qs} + \frac{r_1}{2 \cdot s - 1}) + (\underline{Z}_{qs} + r_1) \cdot (\underline{Z}_{ds} + \frac{r_1}{2 \cdot s - 1})}, \quad (190)$$

$$\underline{I}''_1 = \frac{\underline{U} \cdot (\underline{Z}_{qs} - \underline{Z}_{ds})}{(\underline{Z}_{ds} + r_1) \cdot (\underline{Z}_{qs} + \frac{r_1}{2 \cdot s - 1}) + (\underline{Z}_{qs} + r_1) \cdot (\underline{Z}_{ds} + \frac{r_1}{2 \cdot s - 1})}. \quad (191)$$

Действующее значение тока статора

$$I_1 = \sqrt{I_1'^2 + I_1''^2}. \quad (192)$$

Момент вращения

$$M = (U \cdot I'_{1a} - I_1'^2 \cdot r_1 + I_1''^2 \cdot \frac{r_1}{2 \cdot s - 1}) \cdot \frac{1}{\cos \varphi_1}, \quad (193)$$

где  $I'_{1a}$  – активная составляющая тока  $I'_1$ .

Последний член в выражении (193) в скобках соответствует моменту, создаваемому током  $I_1''$ . При скольжении  $s > 0,5$  этот момент положительный, а при  $s < 0,5$  – отрицательный, в результате чего в кривой  $M = f(s)$  могут наблюдаться провалы. Из-за наличия провалов в кривой момента обмотку ротора замыкают на добавочный резистор с сопротивлением, примерно в 10 раз большим сопротивления самой обмотки.

Расчет по формулам (190)–(193) связан с большой вычислительной работой. Если пренебречь активным сопротивлением  $r_1$

(что вполне допустимо для машин средней и большой мощности), то получим:

$$\underline{I}'_1 = \frac{U \cdot (\underline{Z}_{qs} + \underline{Z}_{ds})}{2 \cdot \underline{Z}_{qs} \cdot \underline{Z}_{ds}}, \quad (190')$$

$$\underline{I}''_1 = \frac{U \cdot (\underline{Z}_{qs} - \underline{Z}_{ds})}{2 \cdot \underline{Z}_{qs} \cdot \underline{Z}_{ds}}, \quad (191')$$

$$M = U \cdot I'_{1a} \cdot \frac{1}{\cos \varphi_1}. \quad (193')$$

Погрешность такого расчета по сравнению с расчетом по формулам (190)–(193) не превышает 4 %.

Для построения пусковых характеристик задают ряд значений скольжения  $s$  в пределах от 1 до 0,05 и для каждого его значения определяют ток  $I_1$  и  $M$ .

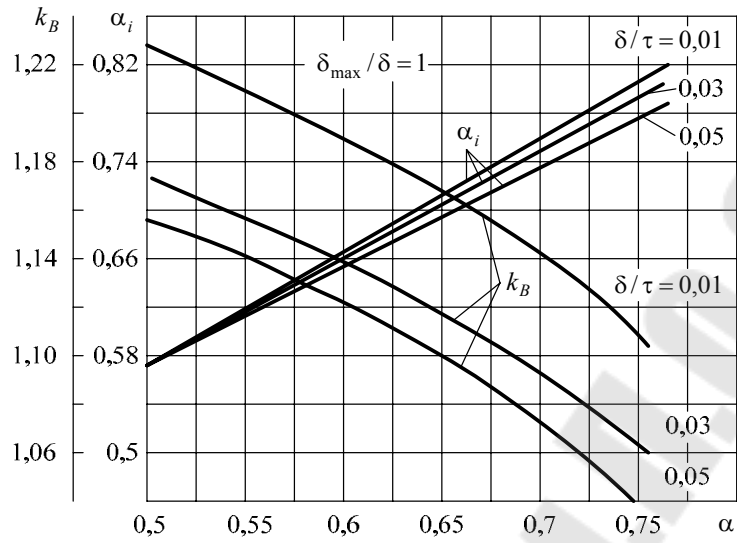
Прежде чем построить зависимости  $I_{1*} = f(s)$  и  $M_* = f(s)$  необходимо убедиться, что пусковой момент  $M_{п*} \geq 0,8$ . Для этого необходимо по формулам (188)–(189) и (190')–(193') определить  $M_{п*}$  при  $s = 1$ . Если  $M_{п*} \geq 0,8$ , то расчет вести для других значений  $s$  в пределах 0,5; 0,2; 0,1; 0,05. Если же  $M_{п*} < 0,8$ , то в целях повышения пускового момента заменяют часть медных стержней на латунные или на стержни фосфористой бронзы того же размера, т. е. осуществляют пересчет активных сопротивлений пусковой клетки. Для этого в формулах (149) и (150) заменяют первый член в скобках выражением:

$$\frac{C'_c \cdot C''_c \cdot l_c}{(C''_c \cdot N'_c + C'_c \cdot N''_c) \cdot S_c}, \quad (194)$$

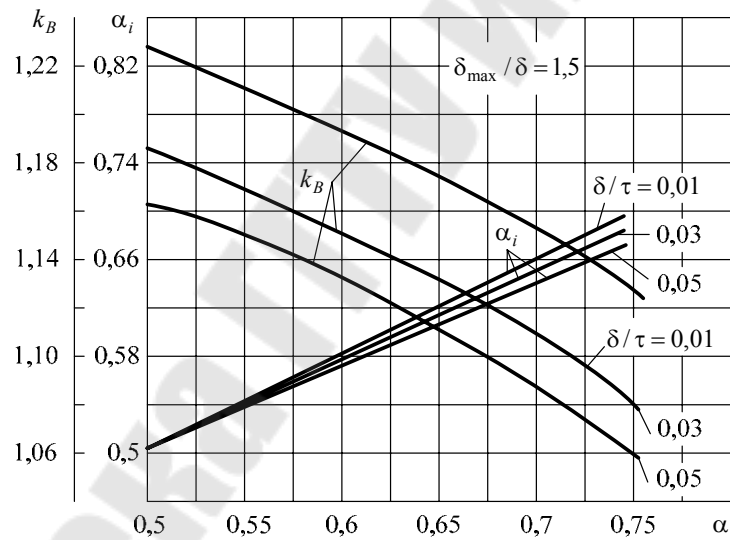
где  $N'_c$  – число стержней на полюс с относительным удельным сопротивлением  $C''_c$ ;

$N''_c$  – число стержней на полюс с относительным удельным сопротивлением  $C'_c$ .

## 16. РИСУНКИ



a)



б)

Рис. 1. Зависимость  $\alpha_i$  и  $k_B$  от  $\alpha$ : а – при равномерном зазоре; б – при неравномерном зазоре ( $\delta_{\max}/\delta = 1,5$ )

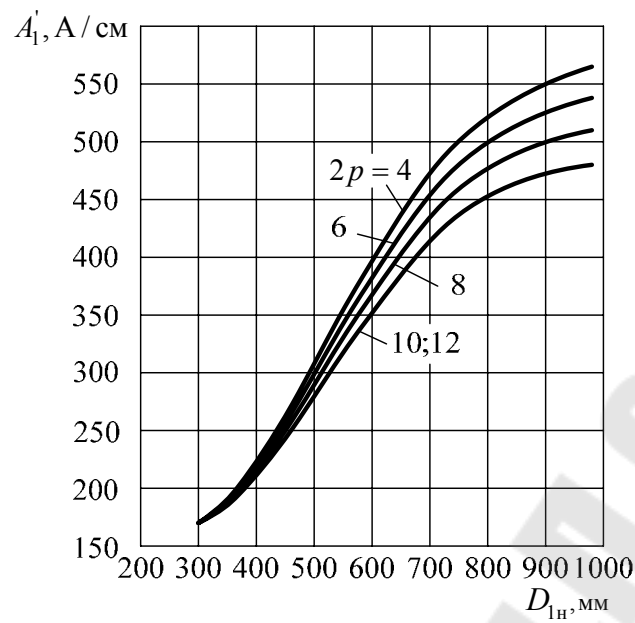


Рис. 2. Среднее значение  $A'_1 = f(D_{1H})$

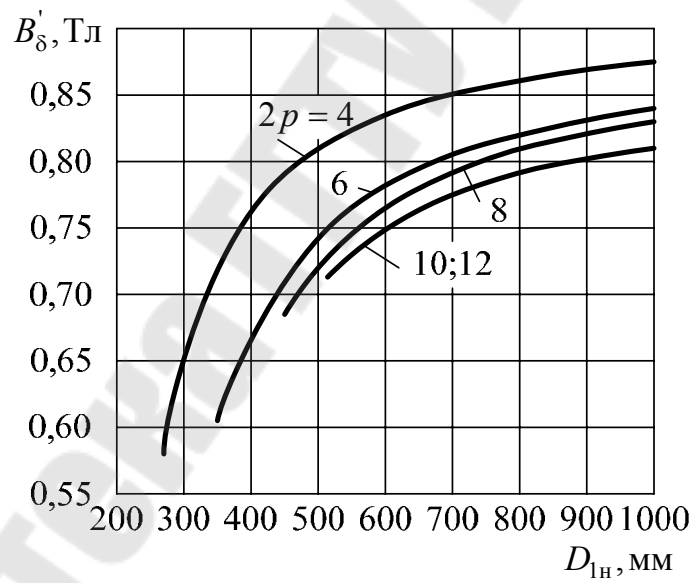


Рис. 3. Среднее значение  $B'_\delta = f(D_{1H})$

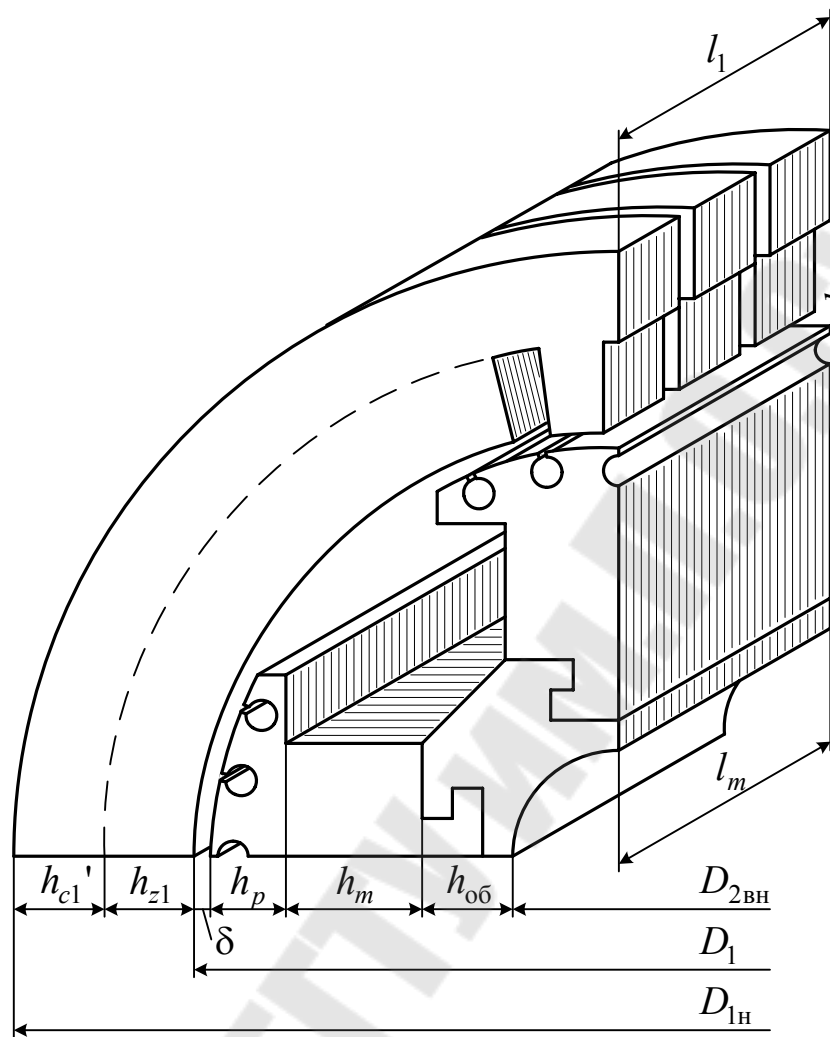


Рис. 4. Активная часть синхронной явнополюсной машины

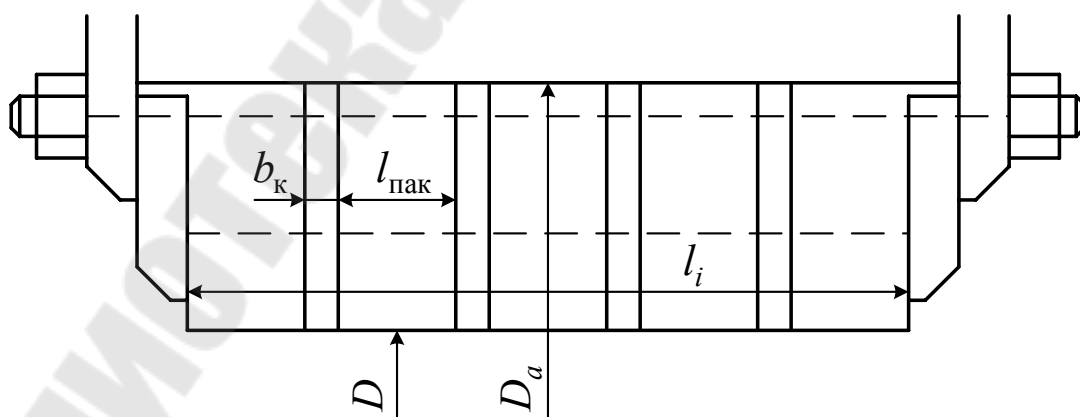


Рис. 5. Размеры активной стали статора



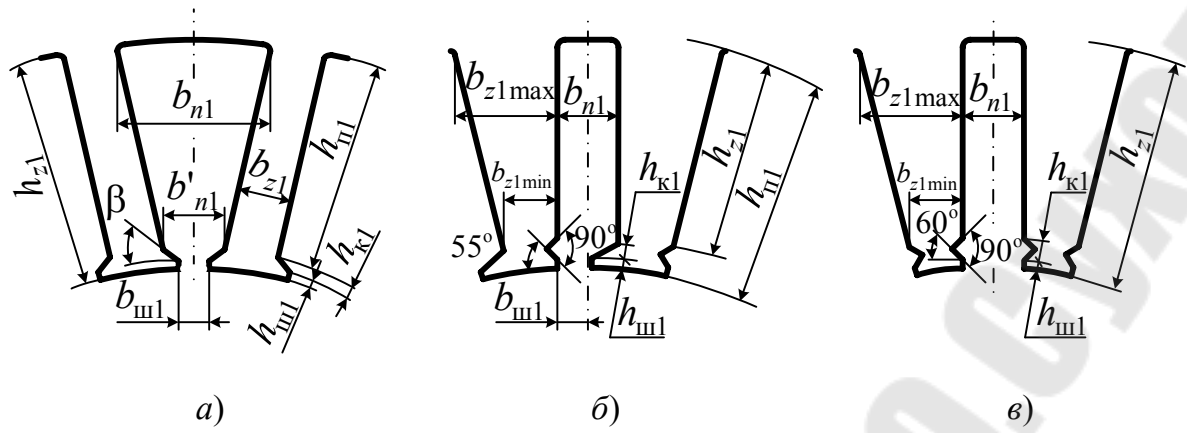


Рис. 6. Пазы статора машин переменного тока:  
 а – полузакрытый трапецидальный; б – полукрытый  
 прямоугольный; в – открытый прямоугольный

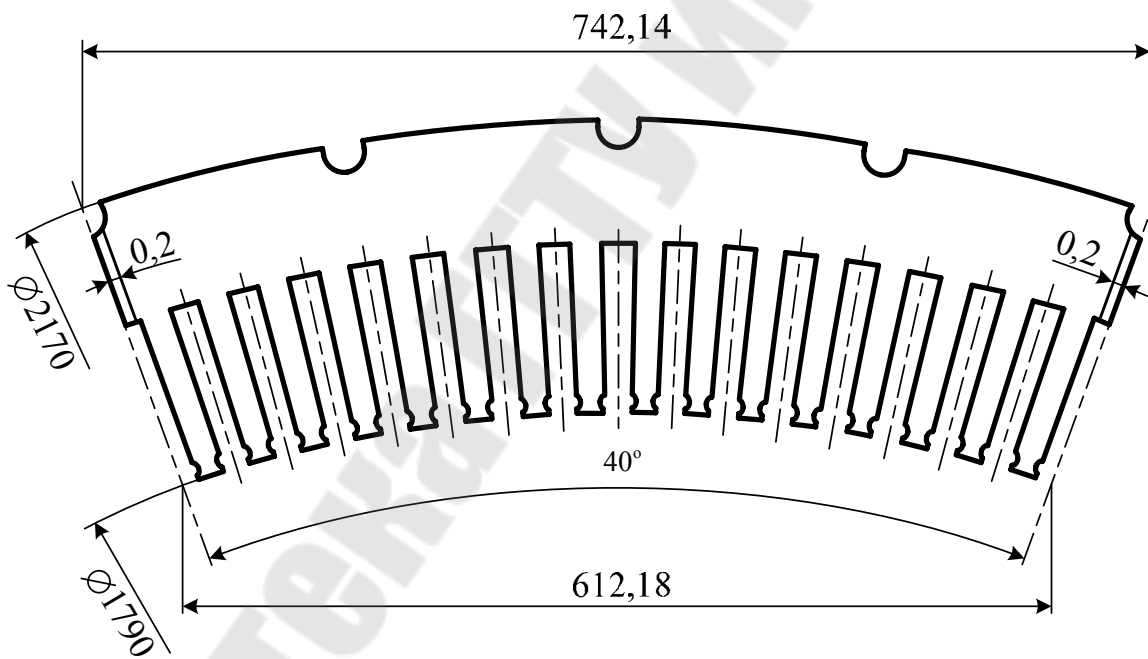


Рис. 7. Сегмент сердечника статора ( $Z = 144, Z_c = 16, C = 9$ )

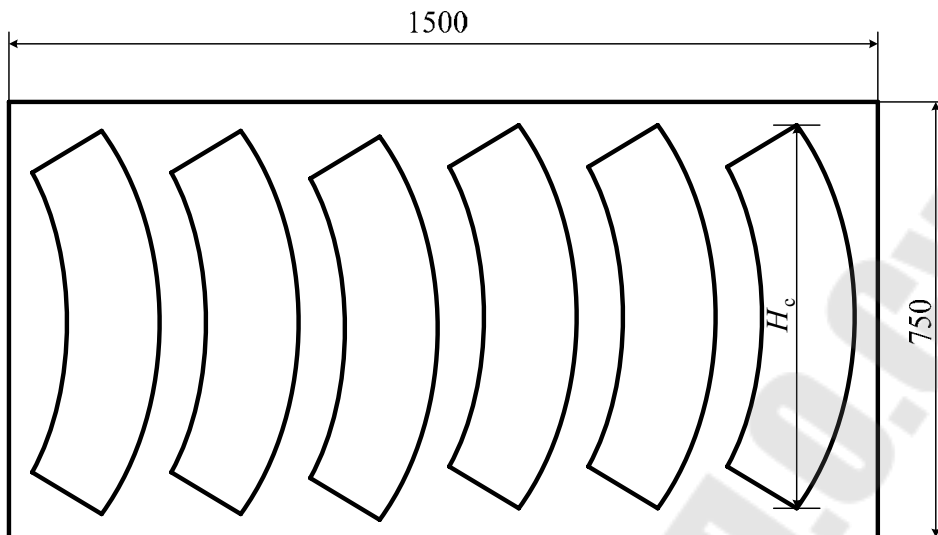


Рис. 8. Раскрой листа электротехнической стали на сегменты

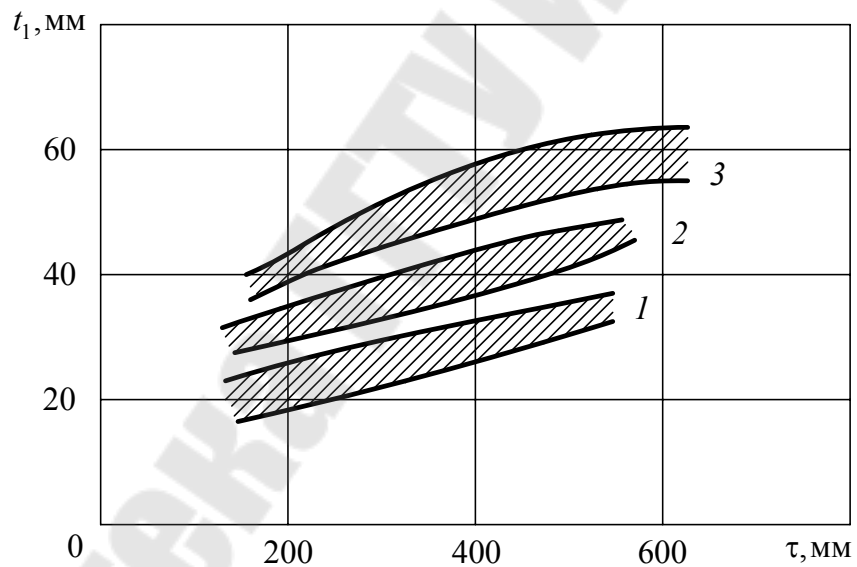


Рис. 9. Предельные значения зубцового деления  $t_1$  для синхронных явнополюсных машин:  
 1 – 13-й и 14-й габариты; 2 – 16-й и 17-й габариты;  
 3 – 18–21-й габариты

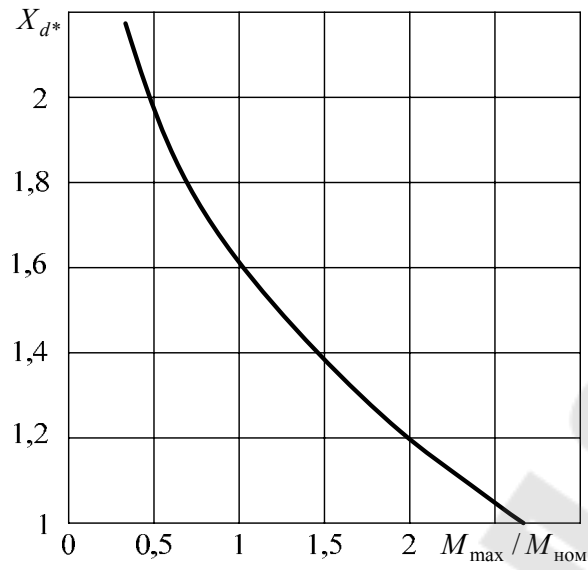


Рис. 10. Зависимость  $x_{dH}$  от  $M_{\max}/M_{\text{ном}}$  для синхронных машин общего назначения

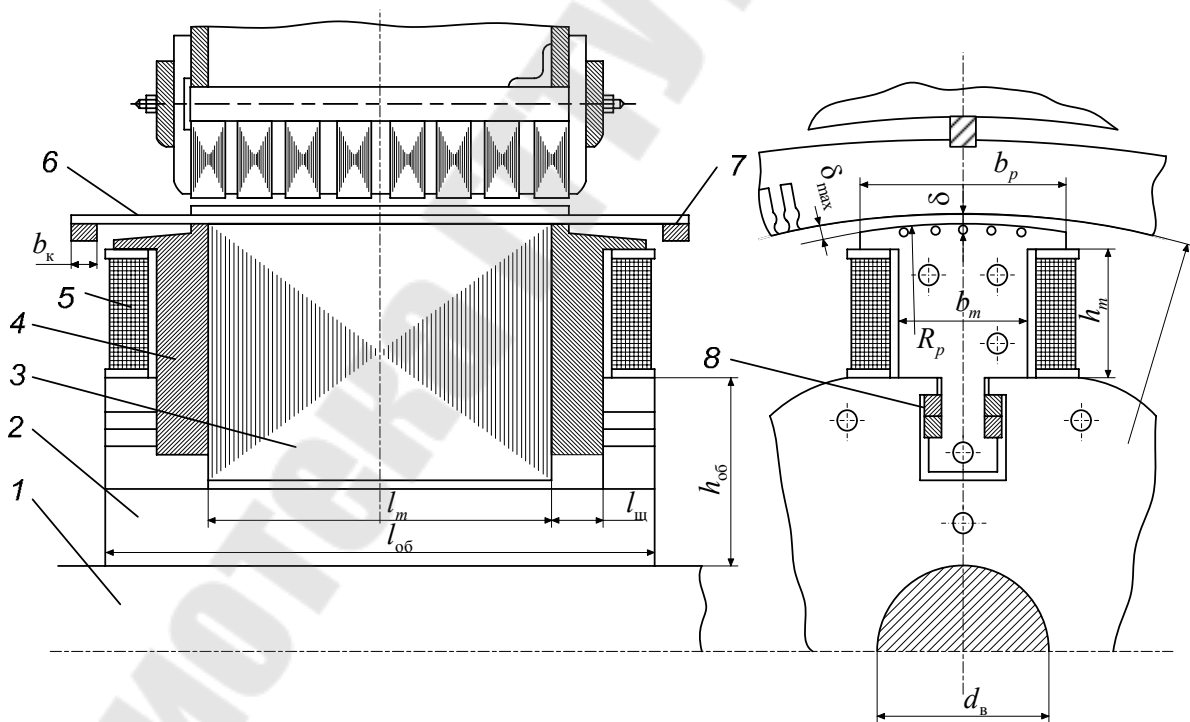


Рис. 11. Полус ротора синхронной машины:

1 – вал; 2 – обод; 3 – сердечник полюса; 4 – щека; 5 – полюсная катушка; 6 – стержни; 7 – сегменты; 8 – шпонка

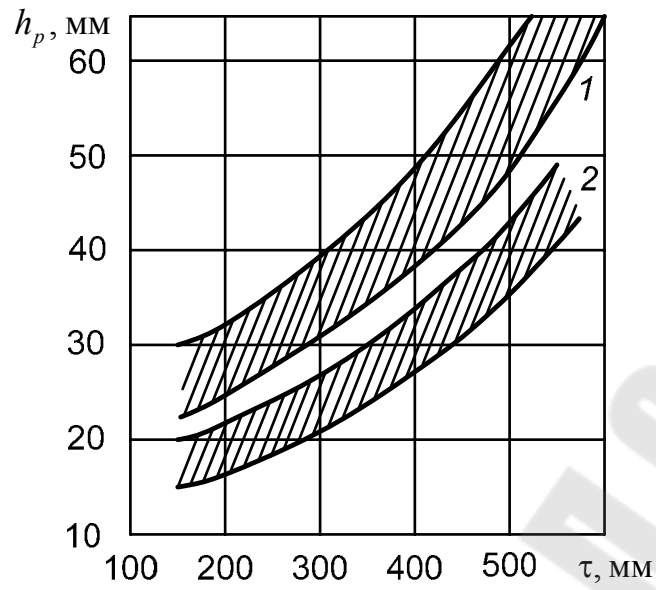


Рис. 12. Рекомендуемые значения высоты полюсного наконечника  $h_p$ : 1 – с пусковой клеткой; 2 – без нее

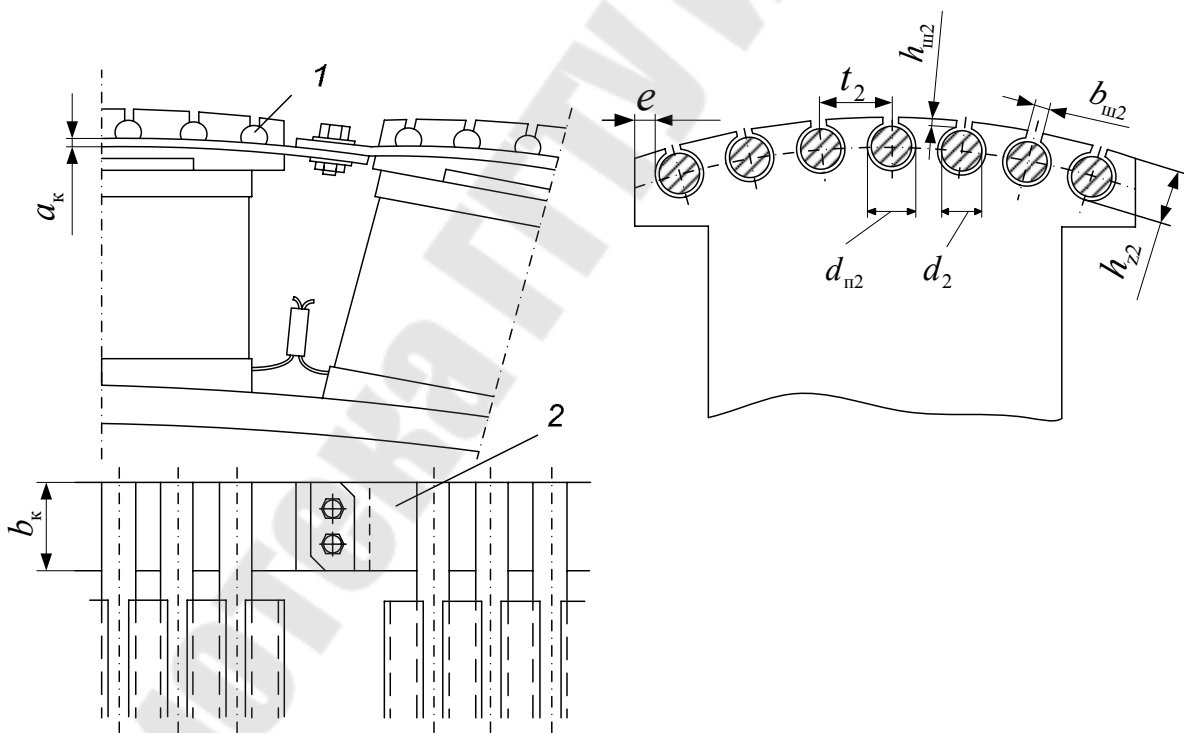


Рис. 13. Пусковая (успокоительная) обмотка: 1 – стержень; 2 – короткозамыкающий сегмент

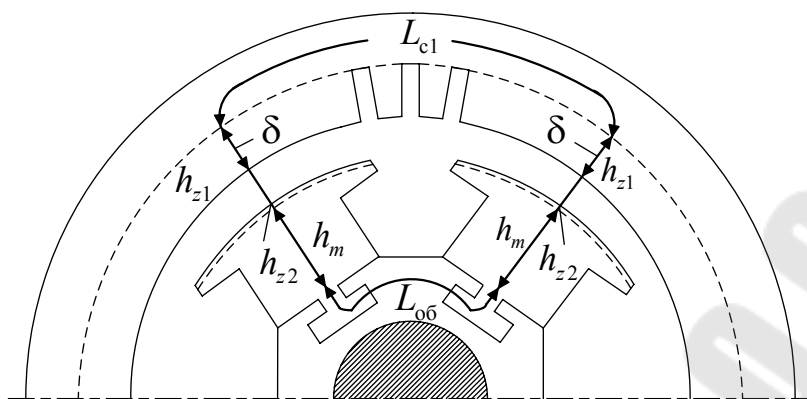


Рис. 14. Расчетный участок магнитной цепи явнополюсной синхронной машины

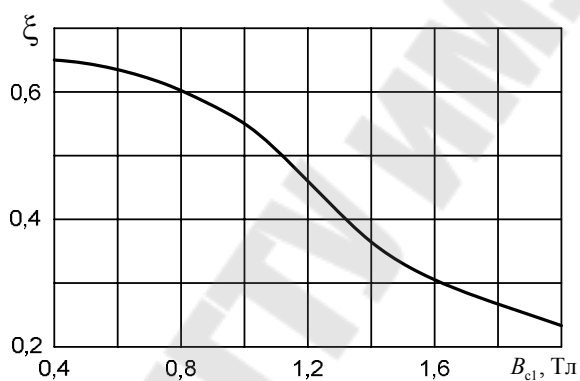


Рис. 15. Зависимость  $\xi$  от  $B_{c1}$

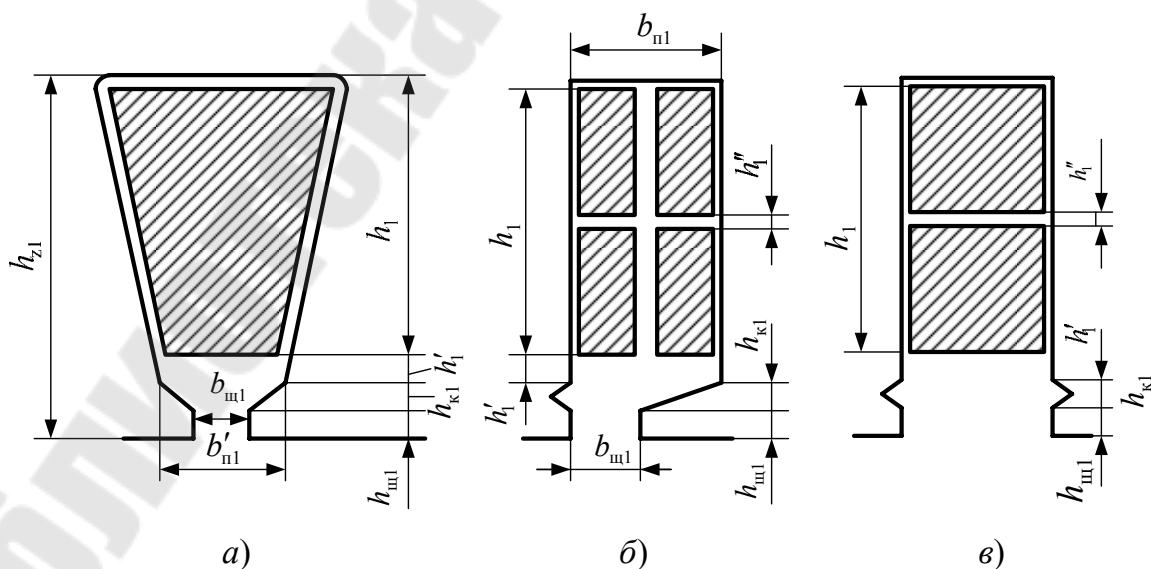


Рис. 16. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния

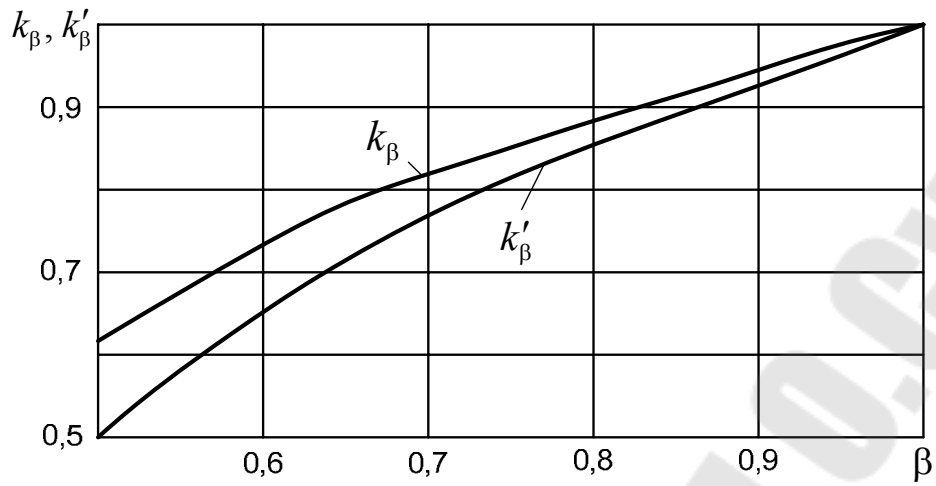


Рис. 17. К определению коэффициентов  $k_\beta$  и  $k'_\beta$

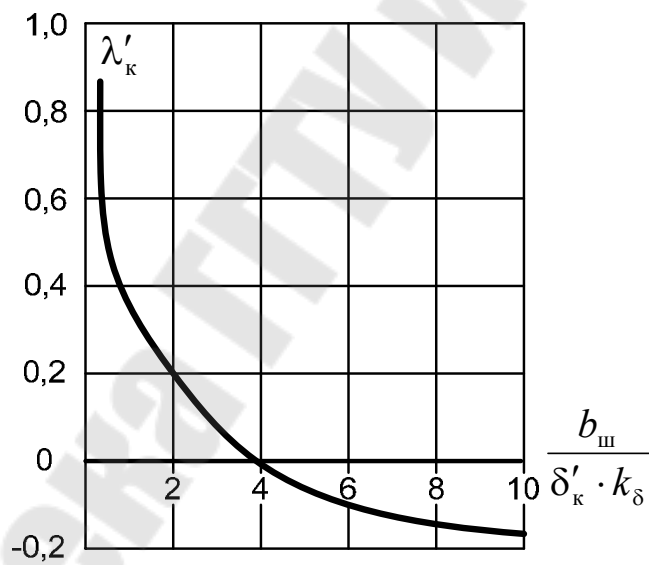


Рис. 18. Зависимость  $\lambda'_\kappa$  от отношения  $b_{III}/(\delta'_\kappa \cdot k_\delta)$

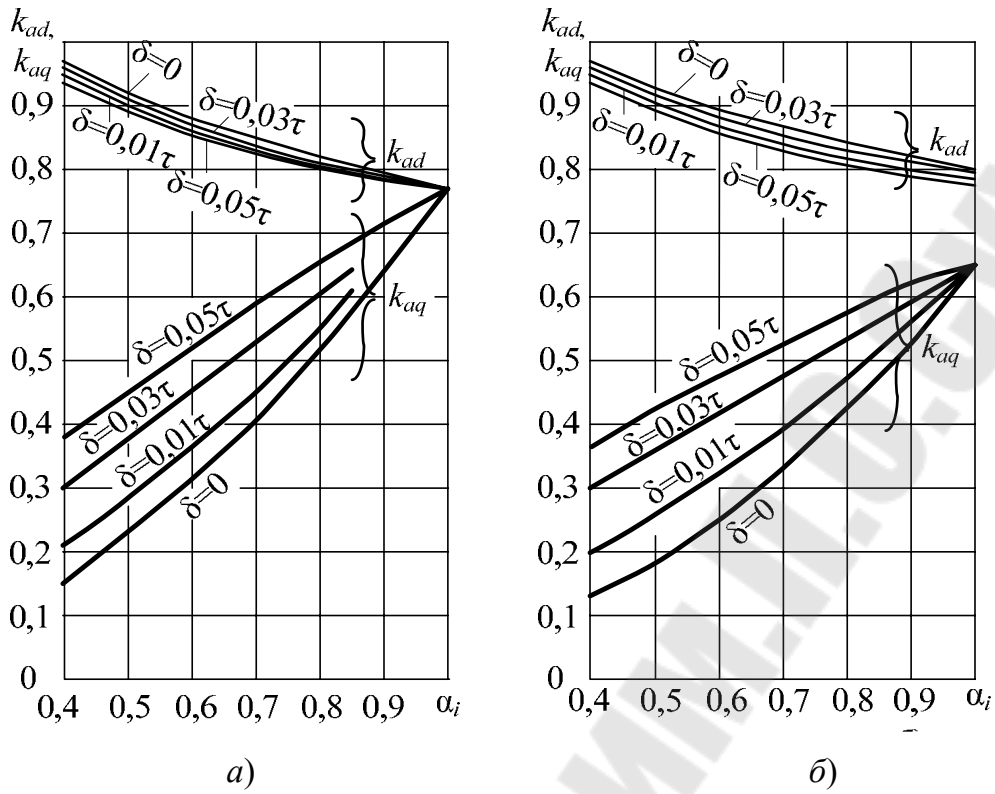


Рис. 19. К определению коэффициентов приведения  $k_{ad}$  к  $k_{aq}$ :  
 а – при равномерном зазоре;  
 б – при неравномерном зазоре ( $\delta_{max}/\delta = 1,5$ )

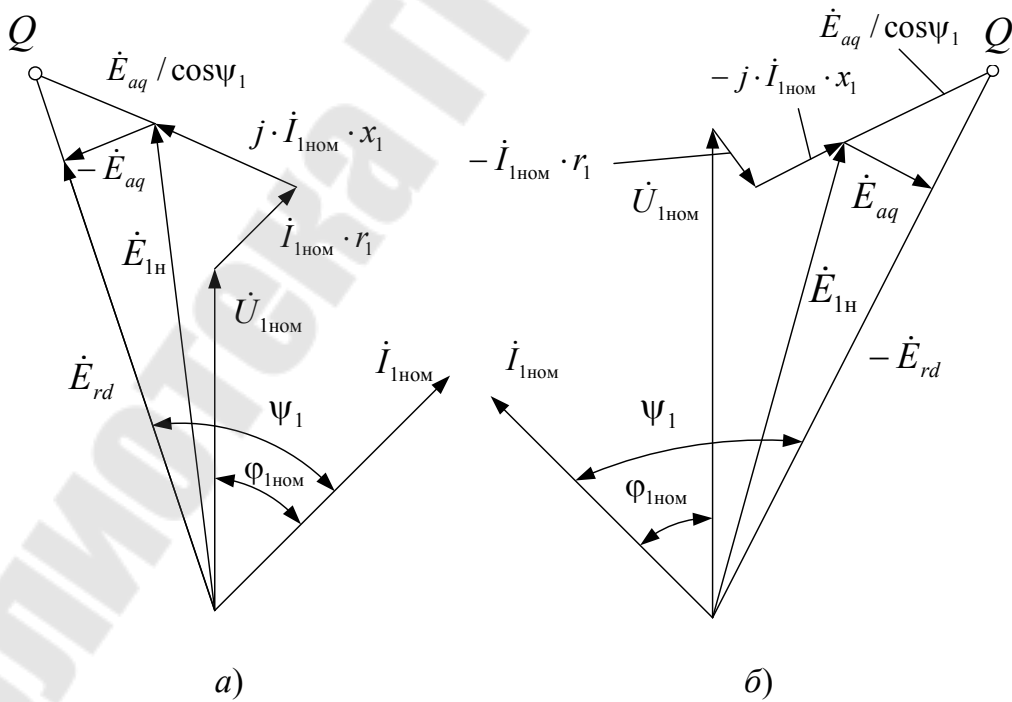


Рис. 20. Векторные диаграммы явнополюсной синхронной машины:  
 а – в режиме генератора; б – в режиме двигателя

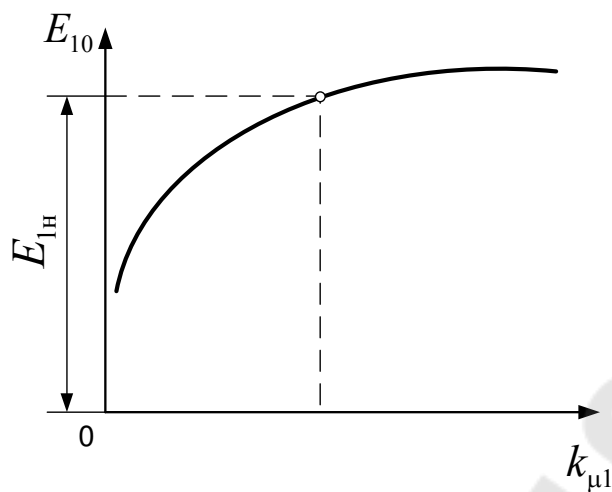


Рис. 21. Зависимость  $E_{10}$  от  $k_{\mu 1}$

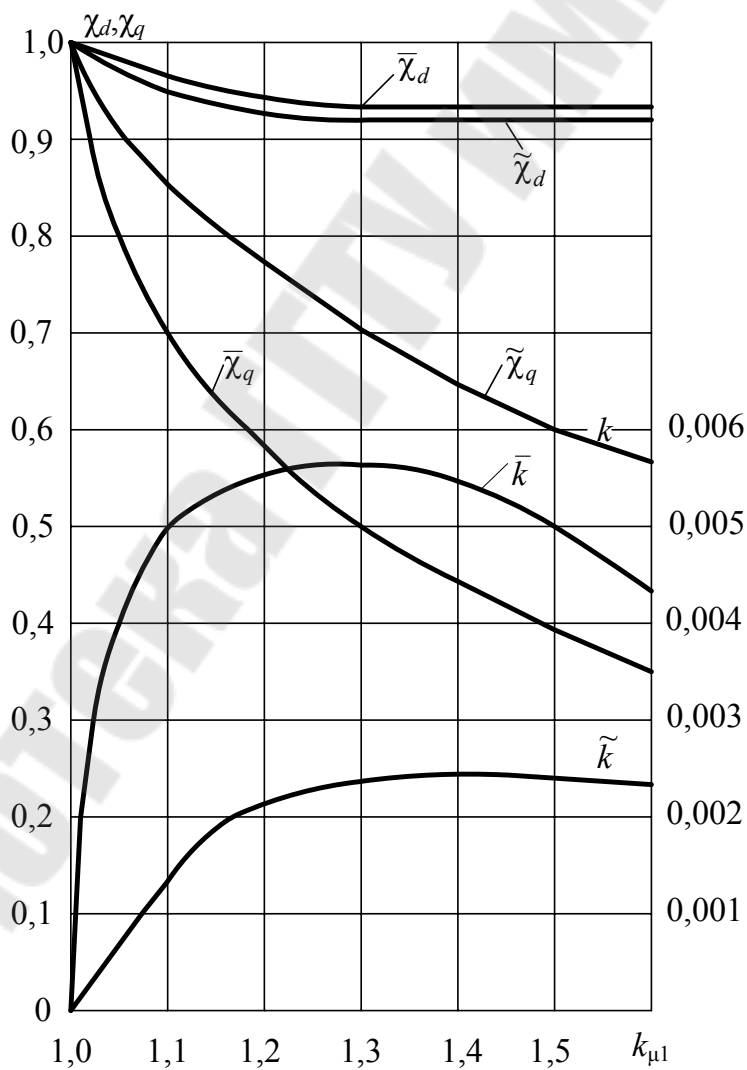


Рис. 22. Зависимости  $x_d$ ,  $x_q$  и  $k$  от  $k_{\mu 1}$



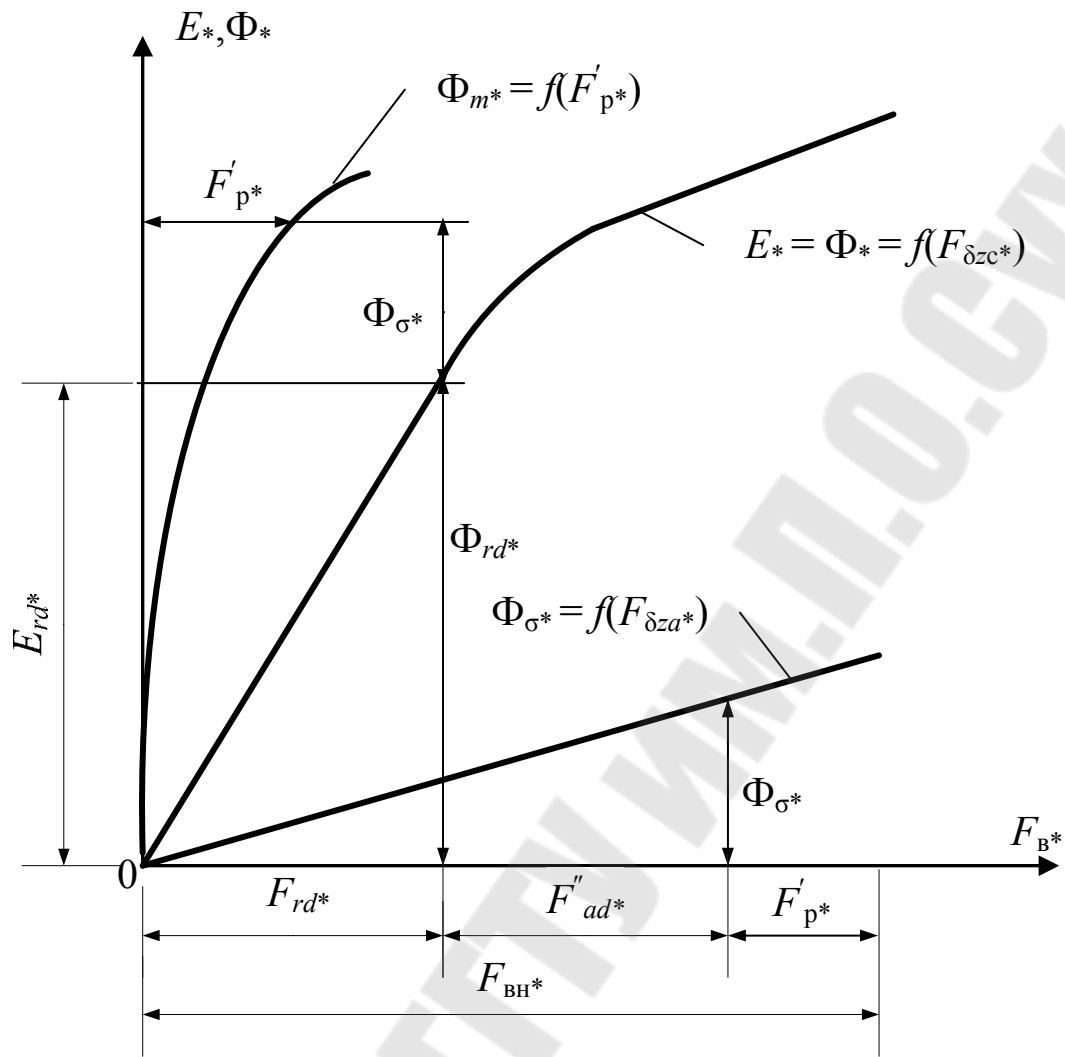


Рис. 23. Частичные характеристики намагничивания

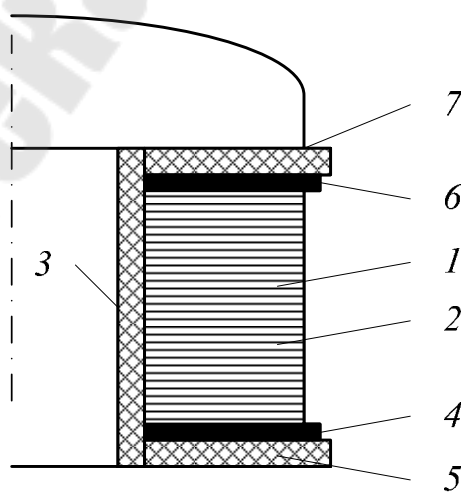


Рис. 24. Изоляция катушки однорядной обмотки возбуждения

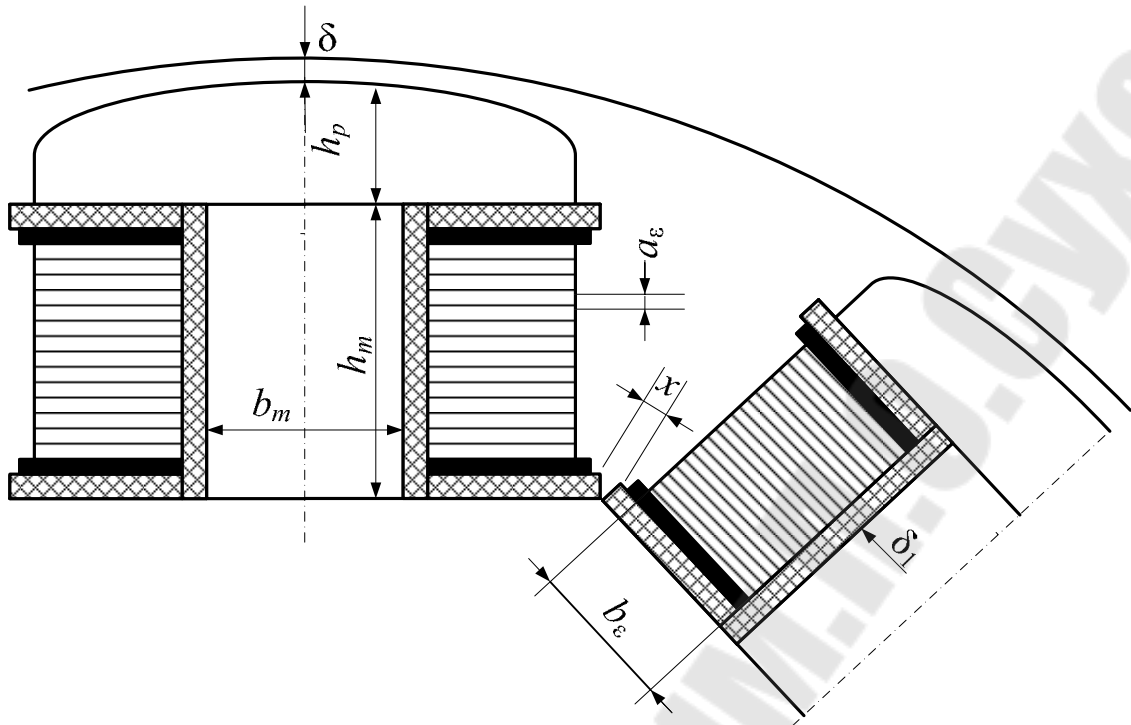


Рис. 25. Однорядные обмотки возбуждения синхронных машин

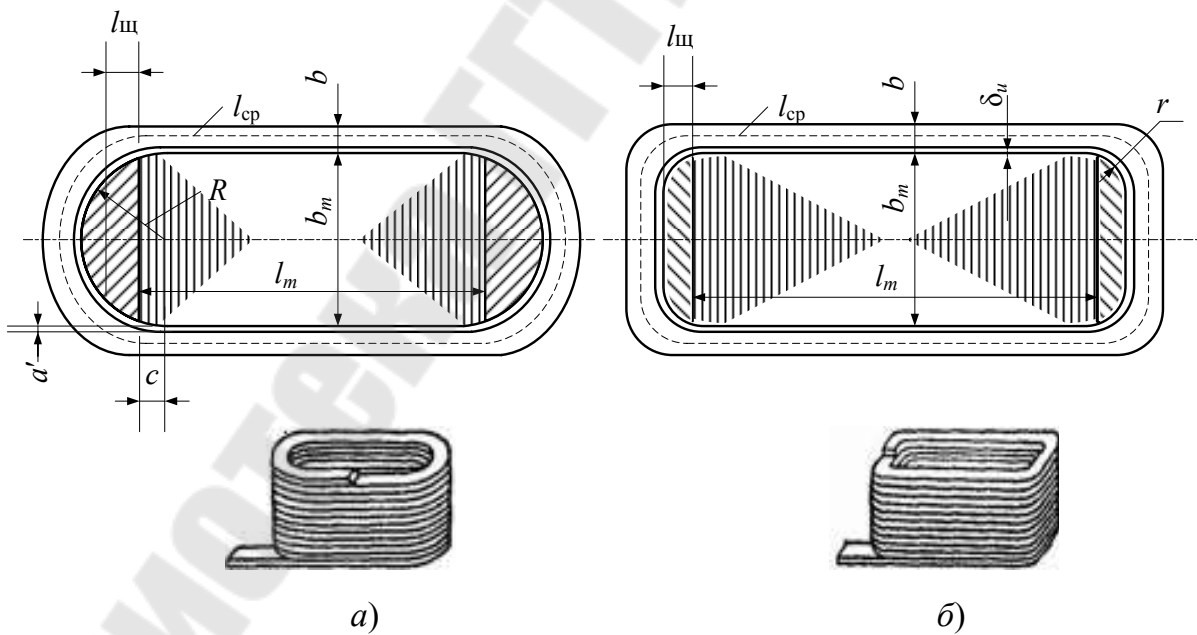


Рис. 26. К расчету средней длины витка однослойных полюсных катушек

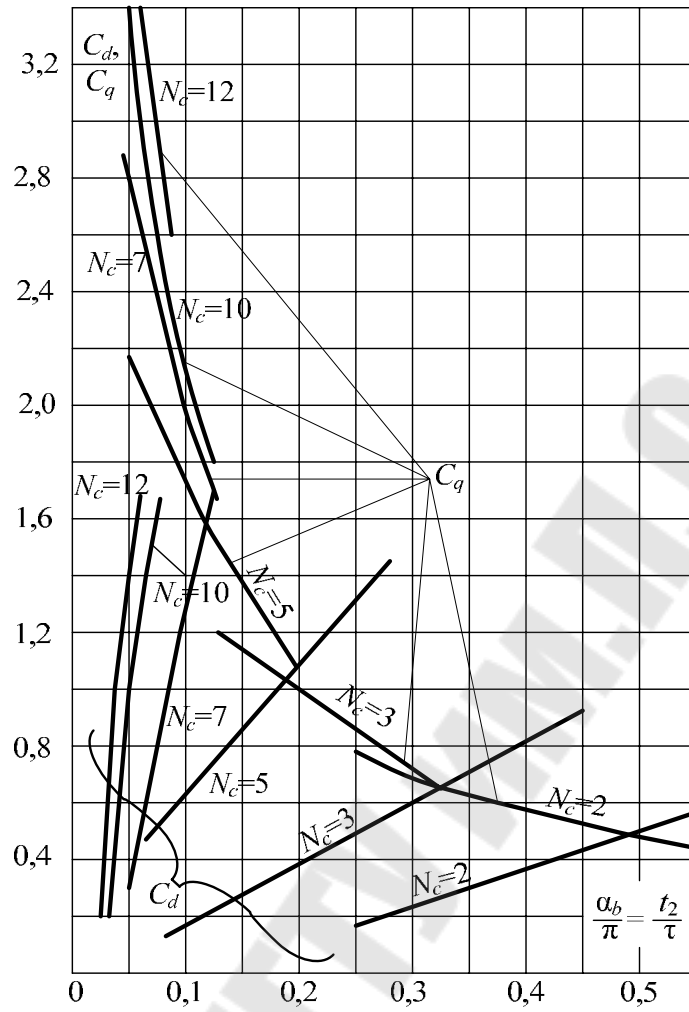


Рис. 27. Коэффициенты приведения  $C_d$  и  $C_q$  для расчета проводимости короткозамыкающих колец

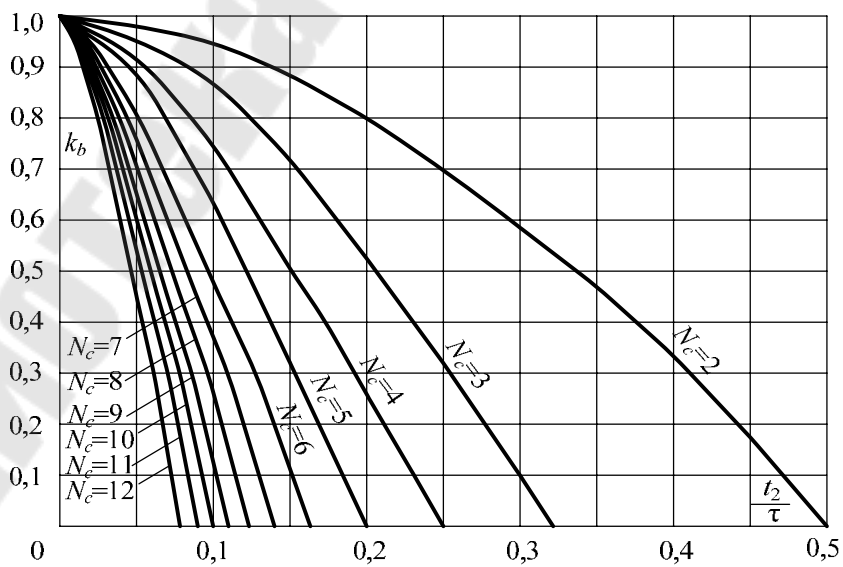


Рис. 28. Коэффициенты распределения для успокоительной (пусковой) обмотки

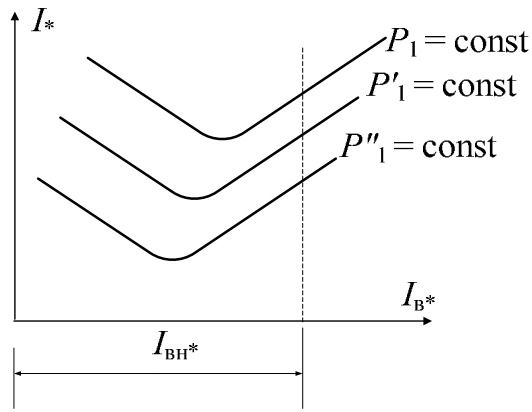


Рис. 29. U-образные характеристики

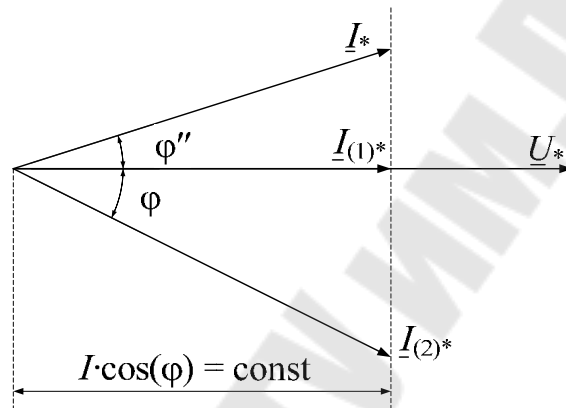


Рис. 30. К построению U-образных характеристик

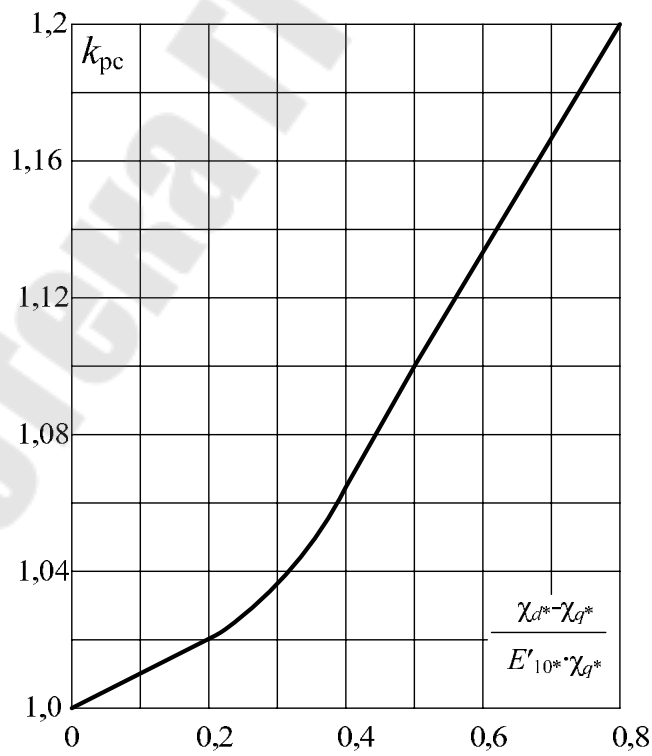


Рис. 31. К определению коэффициента  $k_{pc}$

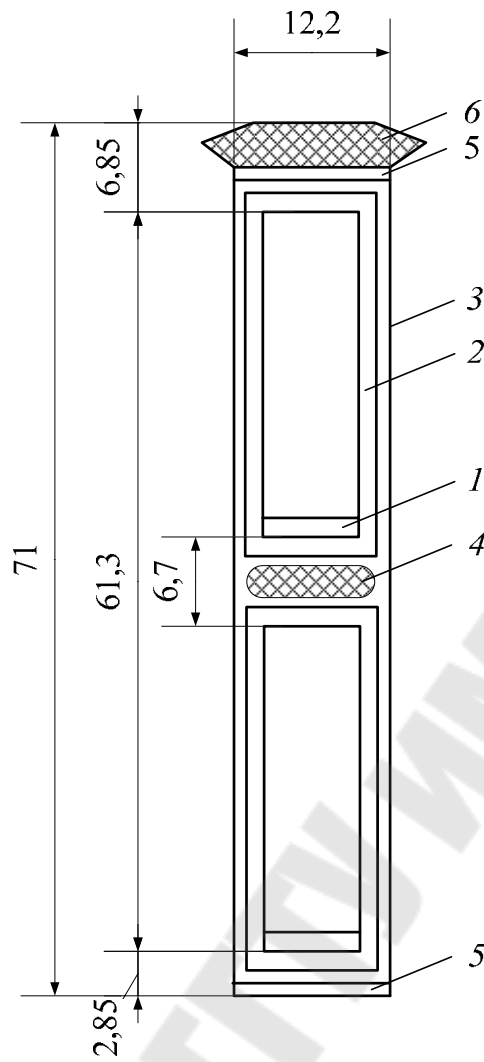


Рис. 32. Паз статора (согласно рис. 16):  
 $h_1 = 61,3$  мм;  $h''_1 = 6,7$  мм;  $h'_1 + h_{к1} = 6,85$  мм

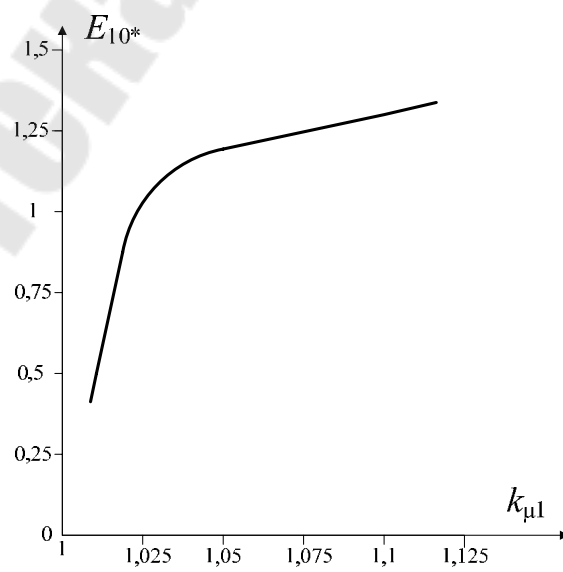


Рис. 33. Зависимость  $E_{10*}$  от  $k_{\mu 1}$

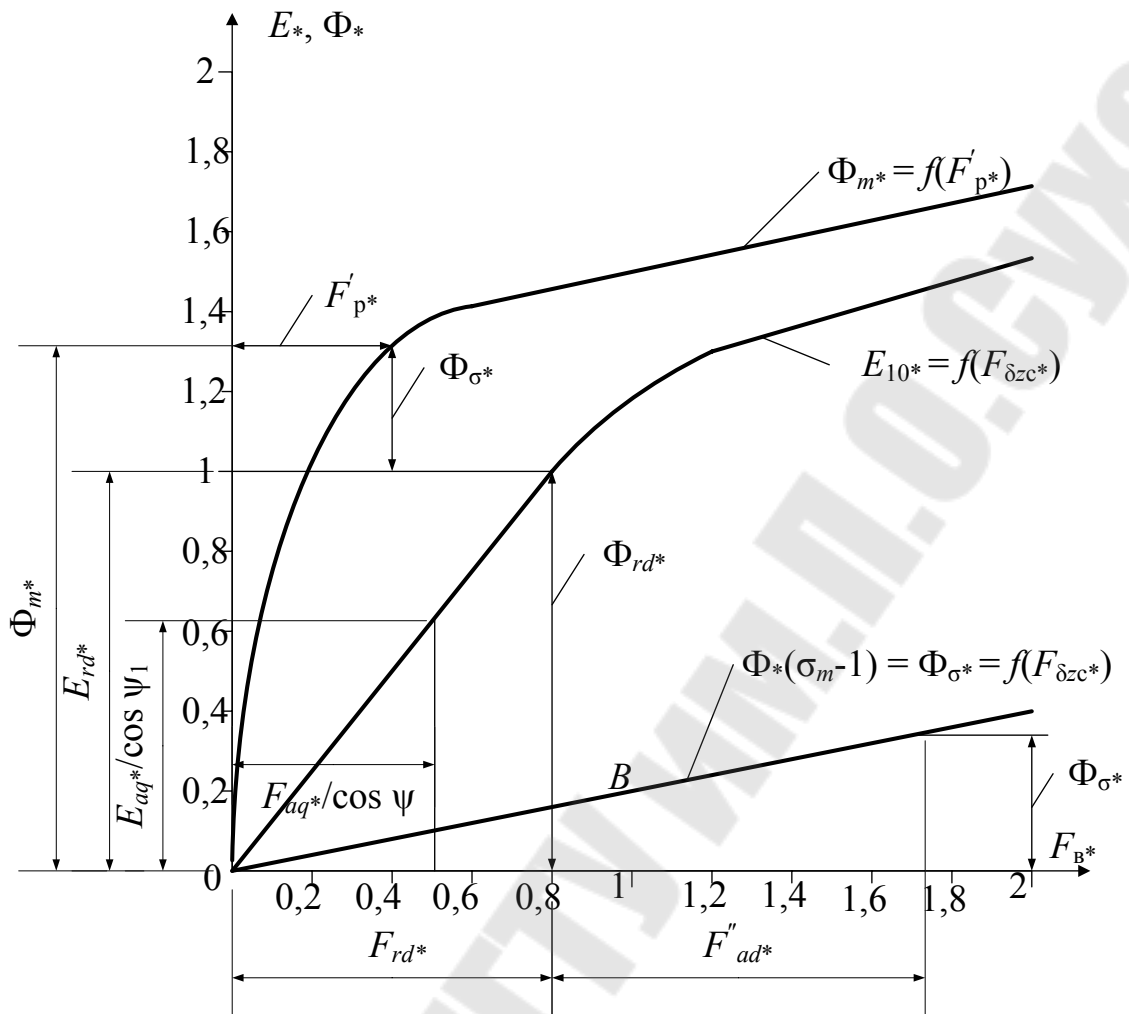


Рис. 34. Частичные характеристики намагничивания

*Примечание.* Поток рассеяния  $\Phi_{\sigma^*}$  представляет небольшую часть от магнитного потока  $\Phi$ , поэтому характеристику  $\Phi_2 = f(F_{\delta zc^*})$  можно считать линейной и прямую провести через точки 0 и B.

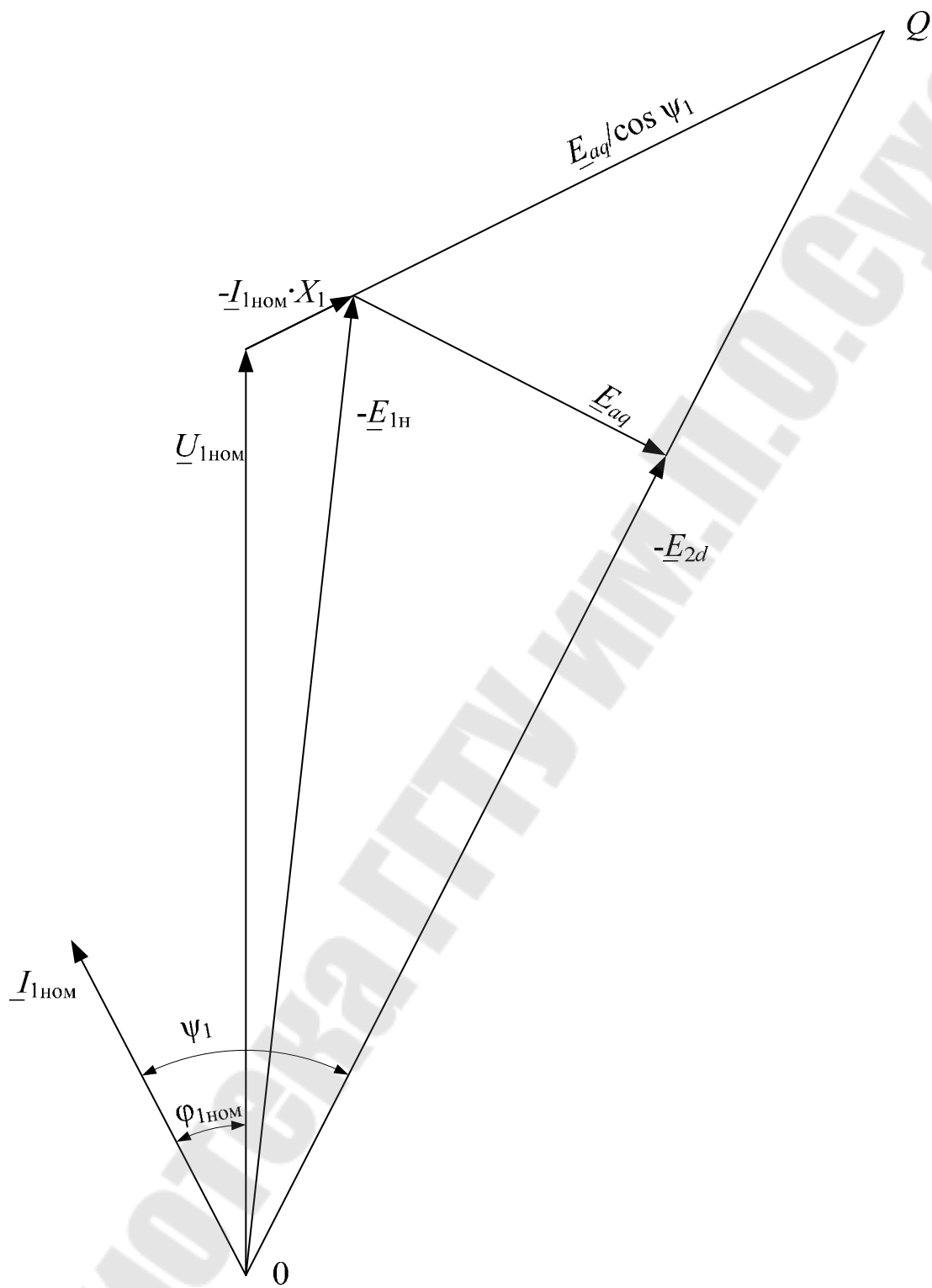


Рис. 35. Векторная диаграмма синхронного двигателя для номинального тока

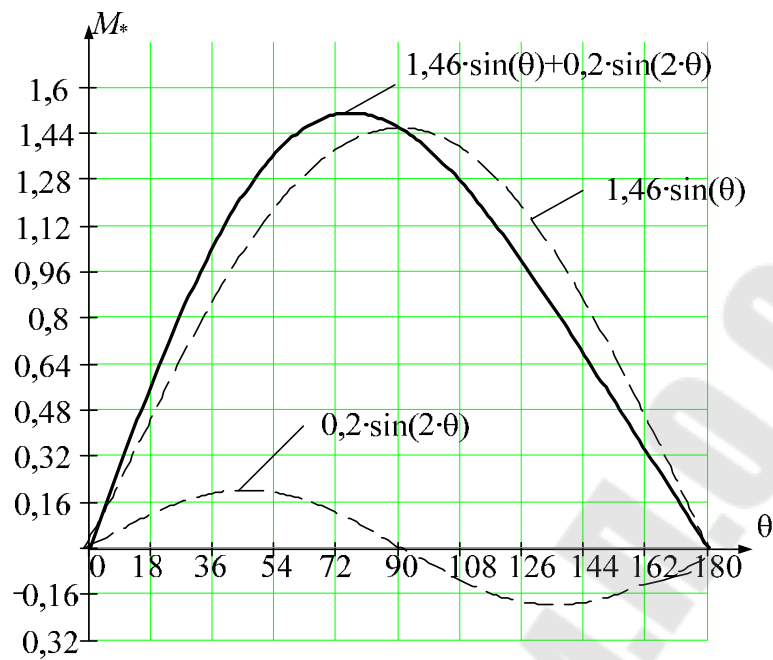


Рис. 36. Угловая характеристика:  
 исходные данные:  $X_{вс*} = 0,29$ ;  $r_{в*} = 10$ ;  $X r_B = 0,0427$ ;  
 $X_{kd*} = 0,107$ ;  $X_{kq*} = 0,058$ ;  $r_{kd*} = 0,0863$ ;  $r_{kq*} = 0,0466$ ;  
 $X_{l*} = 0,137$ ;  $X_{ad*} = 1,25$ ;  $X_{aq*} = 0,68$

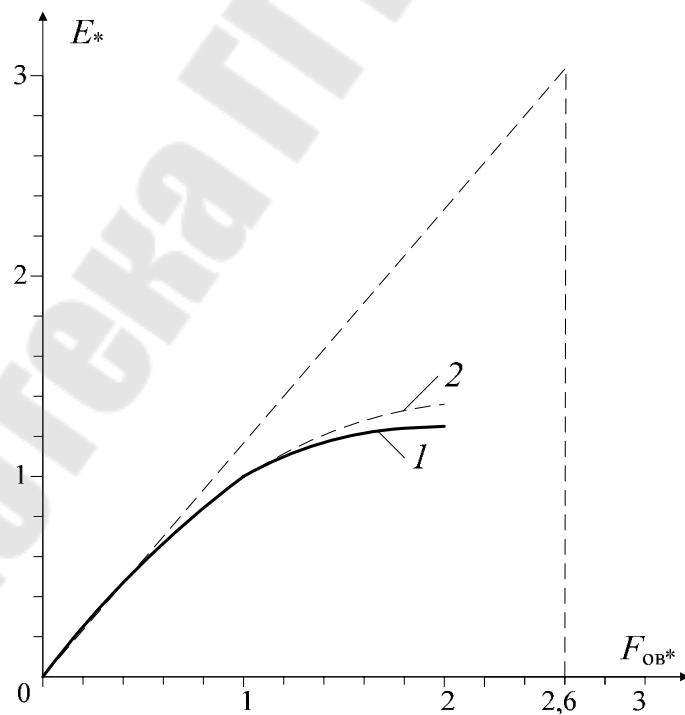


Рис. 37. Характеристика холостого хода:  
 1 – расчетная характеристика; 2 – нормальная характеристика



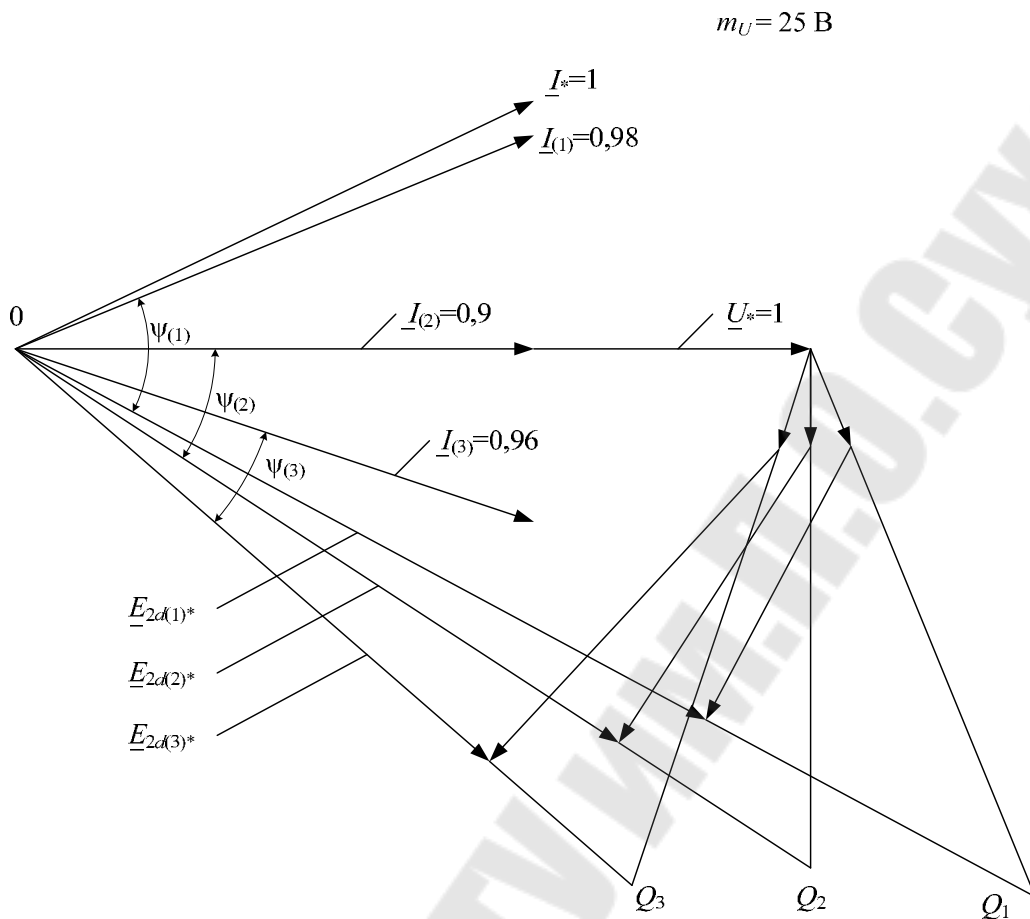


Рис. 38. Векторная диаграмма для построения U-образной характеристики номинального режима

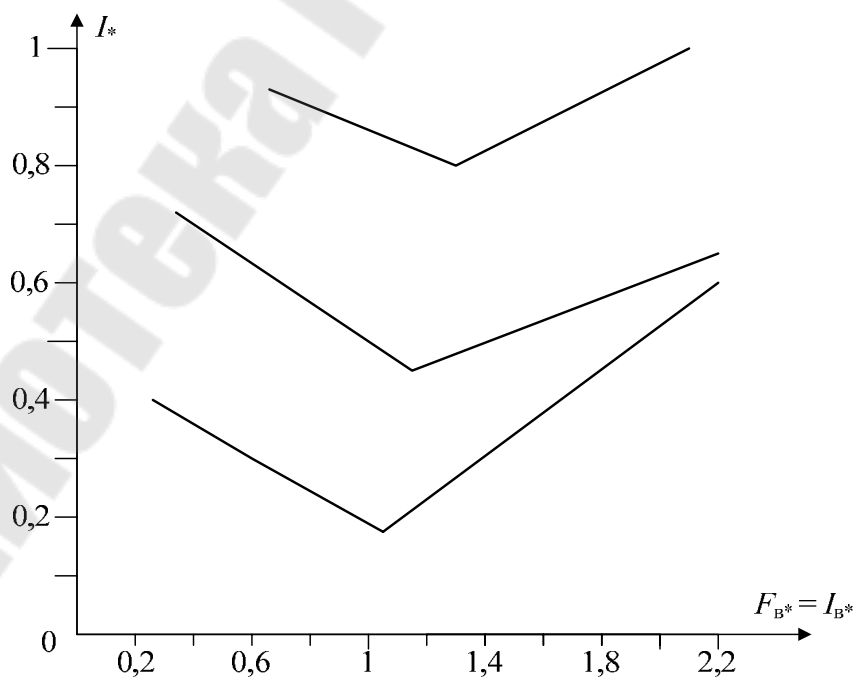


Рис. 39. U-образные характеристики

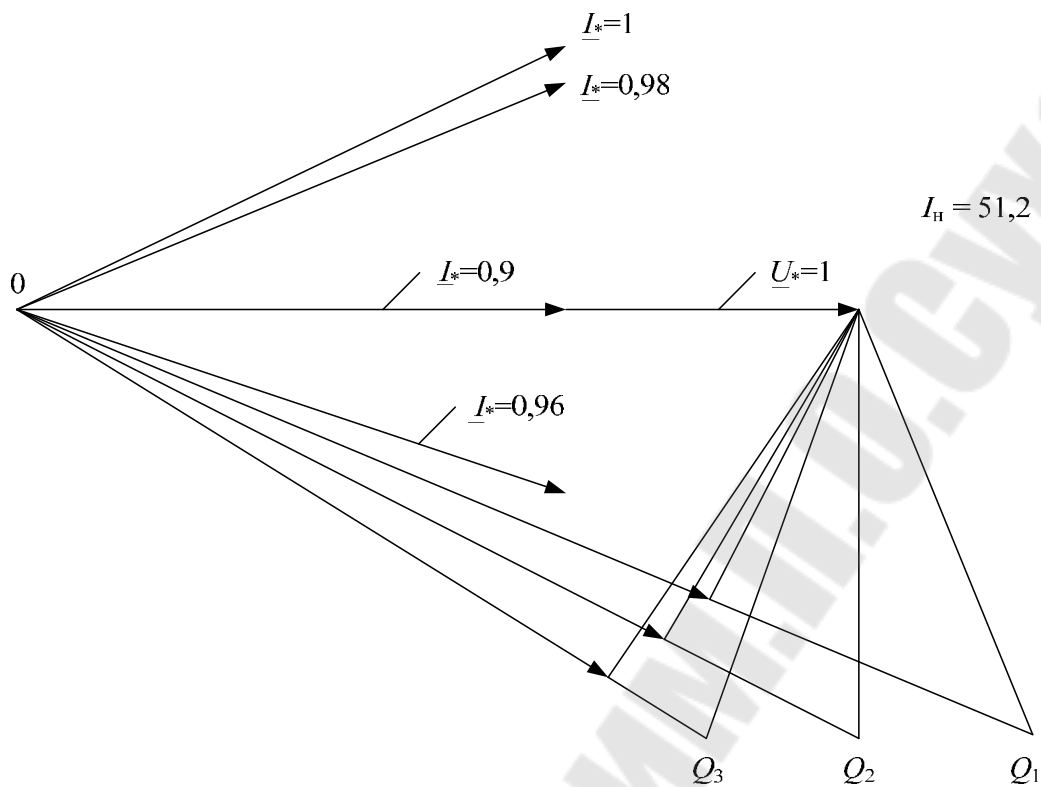


Рис. 40а. Векторные диаграммы для построения U-образных характеристик: для  $P = 0,9 \cdot P_n$

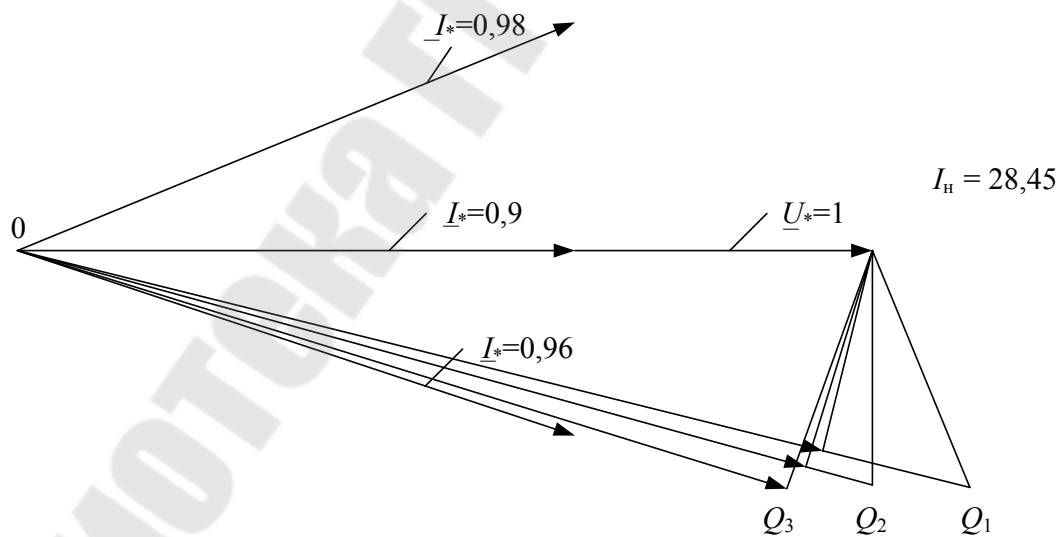


Рис. 40б. Векторные диаграммы для построения U-образных характеристик: для  $P = 0,5 \cdot P_n$

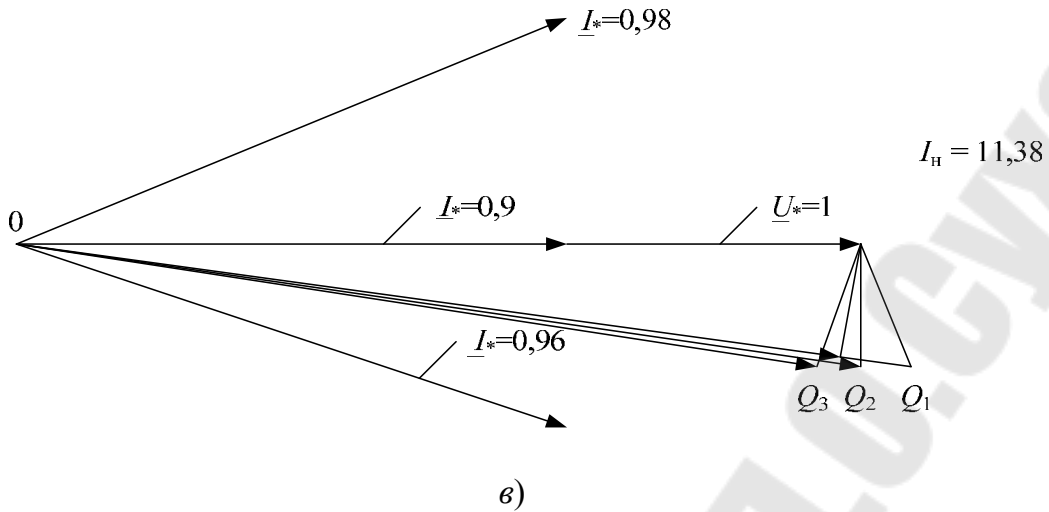


Рис. 40в. Векторные диаграммы для построения U-образных характеристик: для  $P = 0,2 \cdot P_H$

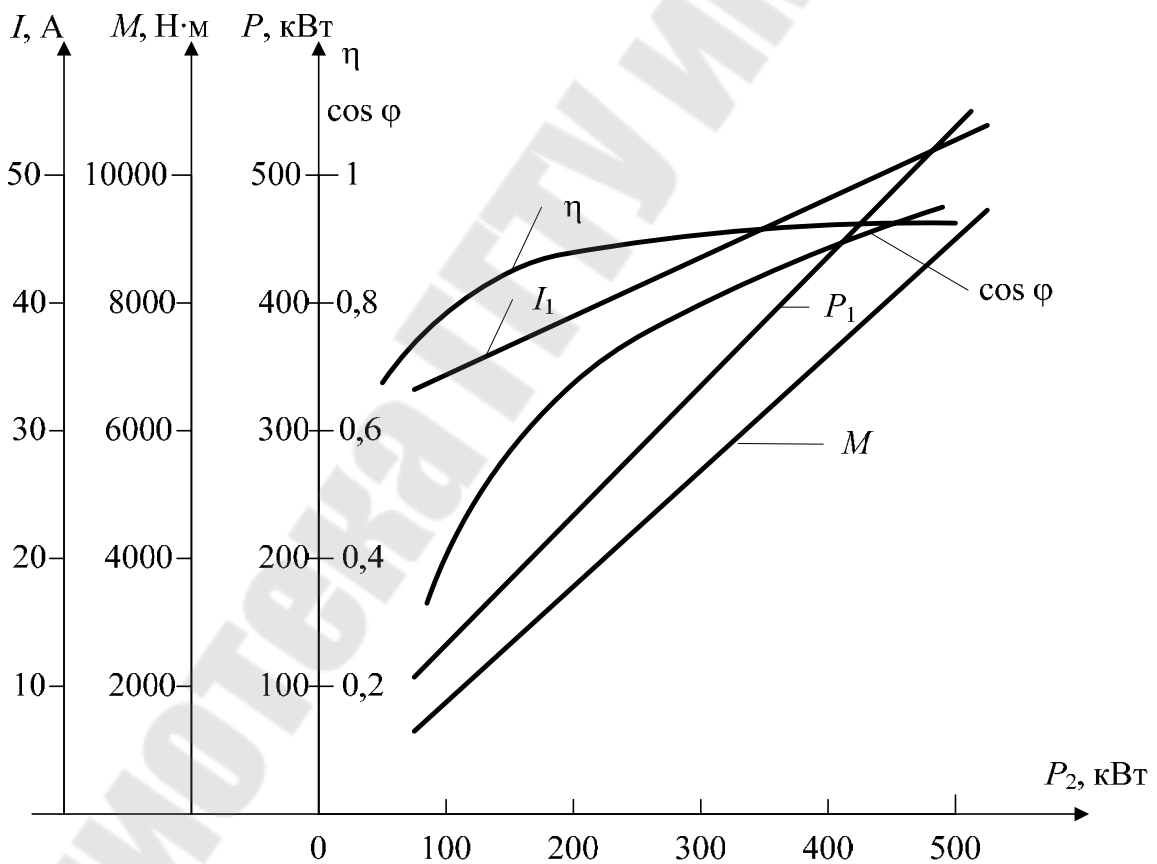


Рис. 41. Рабочие характеристики синхронного двигателя при  $I_{BH} = \text{const}$

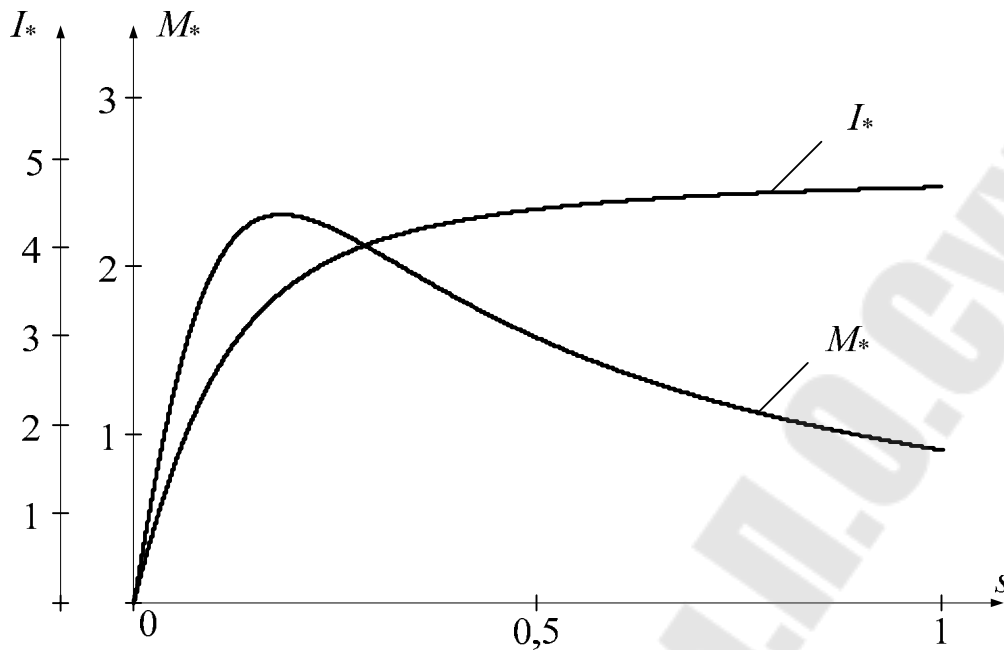


Рис. 42. Пусковые характеристики

## 17. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Задание.** Рассчитать трехфазный синхронный двигатель на базе серии СДН2.

**Исходные данные:**

- номинальная мощность  $P_{\text{ном}} = 500$  кВт;
- частота тока сети  $f_1 = 50$  Гц;
- номинальное напряжение сети (линейное)  $U_C = 6000$  В;
- частота вращения ротора  $n = 500$  об/мин;
- коэффициент мощности (опережающий)  $\cos \varphi_1 = 0,9$ ;
- статическая перегружаемость  $M_{\text{max}} = 1,8$ ;
- схема соединения фаз –  $\Delta$ ;
- режим работы – продолжительный;
- конструкция – с горизонтальным расположением вала, исполнение по способу защиты IP11; на роторе пусковая клетка; способ охлаждения IC01; класс нагревостойкости системы изоляции В.

### 1. Главные размеры двигателя

1.1. По таблице 2 выбираем номер габарита – 16, наружный диаметр сердечника статора  $D_{1н} = 1180$  мм (см. табл. 1), высота оси вращения  $h = 630$  мм.

1.2. Внутренний диаметр сердечника статора (1):

$$D_1 = \frac{D_{1н}}{k_D} = \frac{1180}{1,3} \approx 908 \text{ мм},$$

при  $2p = 12$  принимаем  $k_D = 1,3$ .

1.3. Расчетная мощность двигателя (3):

$$P_i = \frac{k_E \cdot P_{ном}}{\eta'_{ном} \cdot \cos\varphi_1} = \frac{1,05 \cdot 500}{0,937 \cdot 0,9} = 623 \text{ кВт} \cdot \text{А},$$

где  $k_E = 1,05$ , а предварительное значение КПД при номинальной нагрузке двигателя по таблице 5  $\eta'_{ном} = 93,7 \%$ .

1.4. Предварительные значения максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре  $B'_\delta$  и линейной нагрузки  $A'_i$  принимаем по рис. 2 и 3 при полюсном делении

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 908}{12} = 238 \text{ мм} \text{ равны}$$

$$B'_\delta = 0,9 \text{ Тл}; A'_{i i} = 430 \cdot 10^2 \text{ А/м.}$$

1.5. Расчетная длина сердечника статора (4):

$$l_i = \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot P_i}{k'_B \cdot k'_{об} \cdot \alpha_i \cdot n_1 \cdot D_1^2 \cdot B'_\delta \cdot A'_i} =$$
$$= \frac{6,1 \cdot 10^{12} \cdot 623}{1,15 \cdot 0,94 \cdot 0,66 \cdot 500 \cdot 908^2 \cdot 0,9 \cdot 430 \cdot 10^2} = 334 \text{ мм},$$

где предварительные значения коэффициентов принимаем:  $\alpha_i = 0,66$ ;  $k'_B = 1,15$ ;  $k'_{об} = 0,94$ .

1.6. Коэффициент длины сердечника статора (5):

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau} = \frac{319}{238} = 1,4,$$

что находится в пределах рекомендуемых значений при  $2p = 12$ .

1.7. Фактическая длина сердечника (6):

$$l_1 = l_i + n_k \cdot b_k = 334 + 6 \cdot 10 = 394 \text{ мм.}$$

## 2. Сердечник и обмотка статора

### 2.1. Номинальный ток статора (14):

$$I_1 = \frac{P_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{1\text{НОМ}} \cdot \eta'_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_1} = \frac{500 \cdot 10^3}{3 \cdot 3464 \cdot 0,94 \cdot 0,9} = 56,9 \text{ А,}$$

где фазное напряжение  $U_{1\text{НОМ}} = \frac{U_c}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ В}$  (схема соединения обмотки статора – звезда). Число параллельных ветвей обмотки статора принимаем  $a_1 = 1$ .

2.2. Число пазов сердечника статора: по рис. 9 для 16-го габарита при  $\tau = 238 \text{ мм}$  определяем минимальное и максимальное значения зубцового деления

$$t_{1\text{min}} = 30 \text{ мм}; t_{1\text{max}} = 36 \text{ мм}$$

и соответствующее максимальное и минимальное числа пазов (11):

$$z_{1\text{max}} = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{1\text{min}}} = \frac{\pi \cdot 908}{30} \approx 95;$$

$$z_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{t_{1\text{max}}} = \frac{\pi \cdot 908}{36} \approx 79.$$

Из полученного диапазона чисел пазов требованиям, перечисленным в разделе 4, удовлетворяют значения 81, 84, 90.

Результаты расчета хорды  $H_c$  (10), числа пазов на полюс и фазу  $q_1$ , числа эффективных проводников в пазу по (16), зубцового деления  $t_1$  и фактического значения линейной нагрузки  $A_1$  (17) сведены в таблицу 19:

Таблица 19

Номер варианта	Число пазов $z_1$	Число сегментов	$z_c$	$H_c$ мм	$q_1$	$t_1$	$u_n$	$A_1 \cdot 10^2$ , А/м
1	$81 = 3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3$	9	9	403	$2 \cdot \frac{1}{4}$	35,2	28	453
2	$84 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 7$	6	14	590	$2 \cdot \frac{1}{3}$	34	26	436
3	$84 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 7$	7	12	512	$2 \cdot \frac{1}{3}$	34	26	436
4	$90 = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5$	6	15	590	$2 \cdot \frac{1}{2}$	31,7	24	431

Номер варианта	Число пазов $z_1$	Число сегментов	$z_c$	$H_c$ мм	$q_i$	$t_1$	$u_{п}$	$A_1 \cdot 10^2$ , А/м
5	$90 = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5$	5	18	695	$2 \cdot \frac{1}{2}$	31,7	24	431
6	$90 = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5$	9	10	402	$2 \cdot \frac{1}{2}$	31,7	24	431

Анализ таблицы 19 показывает, что 1, 2, 3 не подходят, так как не удовлетворяют условию (13). Из оставшихся выбираем 4-й вариант, так как обеспечивается наиболее экономичный раскрой листов электротехнической стали шириной 600 мм. Для четвертого варианта уточненное значение линейной нагрузки  $A_1$  практически не отличается от предварительного.

2.3. Поперечное сечение эффективного проводника обмотки статора (18):

$$S'_{1\text{эф}} = \frac{I_{\text{ном}}}{a_1 \cdot \Delta'_1} = \frac{56,9}{1 \cdot 5,5} = 10,35 \text{ мм}^2,$$

где предварительное значение плотности тока принимаем  $\Delta'_1 = 5,5 \text{ А/мм}^2$ .

Так как  $S'_{1\text{эф}} < 18 \text{ мм}^2$ , то эффективный проводник не разделяется на элементарные, т. е. принимаем  $q_{1\text{эл}} = q_{1\text{эф}}$ .

По приложению 2 принимаем обмоточный провод прямоугольного сечения  $10,51 \text{ мм}^2$  с размерами сторон  $a \times b = 1,6 \times 6,7$ .

Учитывая, что проектируемая машина является высоковольтной, принимаем обмоточный провод с эмалево-волокнистой изоляцией марки ПЭТВСД (прил. 4):  $\frac{1,6 \times 6,7}{2,20 \times 7,18}$ .

2.4. Изоляция паза выполняется в соответствии с таблицей 9. При 24 проводниках в катушке, уложенных по одному по ширине паза, с учетом допуска на укладку. Толщина изоляции в пазу равна: по ширине  $C_b = 4,7 \text{ мм}$ , по высоте  $C_h = 12,4 \text{ мм}$ .

2.5. Размеры паза в свету:

Ширина паза (24):

$$b_{\text{пл}} = n_{\text{эл.б}} \cdot b_{\text{из}} + C_b + \delta_{\text{pb}} + \delta_b = 1 \cdot 7,18 + 4,7 + 0,05 + 0,2 = 12,13 \text{ мм};$$

принимаем  $b_{\text{пл}} = 12,2 \text{ мм}$ .

Высота паза (25):

$$\begin{aligned} h_{\text{п1}} &= n_{\text{эл.л}} \cdot a_{\text{из}} + C_h + \delta_{\text{ph}} + h_{\text{к}} + \delta_h = \\ &= 2,4 \cdot 2,2 + 12,4 + 1,2 + 4 + 0,2 = 70,6 \text{ мм}; \end{aligned}$$

принимаем  $h_{\text{п1}} = 70 \text{ мм}$ .

Масштабный эскиз паза дан на рис. 32, спецификация паза дана в таблице 20.

2.6. Уточненное значение плотности тока в обмотке статора (27):

$$\Delta_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a_1 \cdot S_{1\text{эф}}} = \frac{56,9}{1 \cdot 10,51} = 5,41 \text{ А/мм}^2.$$

2.7. Максимальная индукция в зубце (28) и в спинке (29) статора:

$$\begin{aligned} B_{z1\text{max}} &= \frac{B'_\delta \cdot t_1}{(t_1 - b_{\text{п1}}) \cdot k_{\text{с1}}} = \frac{0,9 \cdot 31,7}{(31,7 - 11) \cdot 0,95} = 1,45 \text{ Тл}, \\ B_{\text{с1}} &= \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B'_\delta}{h_{\text{с1}} \cdot k_{\text{с1}}} = \frac{0,5 \cdot 0,66 \cdot 238 \cdot 0,9}{66 \cdot 0,95} = 1,13 \text{ Тл}, \end{aligned}$$

где  $h_{\text{с1}}$  – высота спинки статора (30)

$$h_{\text{с1}} = 0,5 \cdot (D_{\text{н1}} - D) - h_{z1} = 0,5 \cdot (1180 - 908) - 70 = 66 \text{ мм}.$$

Полученные значения магнитных индукций не превышают допустимых значений (см. раздел 4).

2.8. Перепад температуры в изоляции паза (31):

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{\text{из1}} &= \frac{\Delta_1 \cdot A_1 \cdot k_\phi}{4,2 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{t_1}{2 \cdot (b_{\text{п1}} + h_{z1} - h_{\text{к}})} \cdot \frac{0,5 \cdot \delta_{\text{из.п}}}{\lambda_{\text{из}}} = \frac{5,41 \cdot 10^6 \cdot 4,31 \cdot 10^4 \cdot 1,1}{4,2 \cdot 10^{11}} \times \\ &\times \frac{31,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (11 + 70 - 5) \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,5 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3}}{2,2 \cdot 10^{-5}} = 0,61 \cdot 0,21 \cdot 82 = 10,5 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

$$10,5 \text{ }^\circ\text{C} < 35 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Можно сделать вывод, что размеры паза выбраны удачно.



## Спецификация паз статора (изоляция класса В)

Позиция на рис. 32	Наименование	Число слоев, не менее		Толщина, мм	
		по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Провод ПЭТВСД $\frac{1,6 \times 6,7}{2,2 \times 7,18}$ , мм	1	24	1×7,18	2(12×2,2)
2	Лента стекло- слоудинитовая ЛС-0,13 мм	6	В пол- нахлеста	4,5	4,5
3	Лента стеклянная ЛЭС-0,1 мм	1	Встык	0,2	0,2
	Двусторонняя толщина изоляции одной катушки	–	–	4,7	4,7
4	Стеклотекстолит СТ1 толщиной 1 мм	–	2	–	2
5	Стеклотекстолит СТ1 толщиной 0,5 мм	–	2	–	1
	Общая толщина изоляции на паз	–	–	4,7	12,4
	Разбухание изоляции	–	–	0,05	1,2
	Допуск на укладку	–	–	0,2	0,2
6	Клин	–	–	–	4
	Всего	–	–	12,2	71

2.9. Число последовательно соединенных витков в фазе обмотки статора (32):

$$\omega_1 = \frac{p \cdot q_1 \cdot u_{\text{п}}}{a_1} = 6 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{24}{1} = 360.$$

2.10. Шаг обмотки статора (36):

$$y_1 = \frac{\beta' \cdot z_1}{2 \cdot p} = \frac{0,83 \cdot 90}{12} \approx 6 \text{ (из первого в седьмой паз).}$$

Относительный шаг (37):

$$\beta = \frac{2 \cdot p \cdot y_1}{z_1} = \frac{12 \cdot 6}{90} \approx 0,8.$$

2.11. Обмоточный коэффициент обмотки статора (33):

$$k_{об1} = k_{p1} \cdot k_{y1} = 0,96 \cdot 0,95 = 0,91,$$

где  $k_{p1}$  (34) – коэффициент распределения

$$k_{p1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}} = \frac{0,5}{2,5 \cdot \sin 12^\circ} = 0,96,$$

где  $k_{y1}$  (35) – коэффициент укорочения:

$$k_{y1} = \sin \beta \cdot 90^\circ = \sin 0,8 \cdot 90^\circ = \sin 72^\circ = 0,95.$$

### 3. Воздушный зазор и полюсы ротора

3.1. Относительное значение индуктивного сопротивления обмотки статора по продольной оси  $X_{d^*}$  находится по рис. 10.

Согласно рис. 10 при  $M_{\max^*} = 1,8$  получаем  $X_{d^*} = 1,3$ .

3.2. Минимальное значение воздушного зазора (по оси полюса) (38):

$$\delta \approx k_x \cdot 10^{-6} \cdot \frac{A_1}{B'_\delta} \cdot \frac{\tau}{X_{d^*}} = 0,28 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{431 \cdot 10^2}{0,9} \cdot \frac{238}{1,3} = 2,45 \text{ мм.}$$

3.3. Зазор по краям полюсного наконечника:

$$\delta_{\max} = 1,5 \cdot \delta = 1,5 \cdot 2,45 = 3,68 \text{ мм.}$$

3.4. Среднее значение зазора (39):

$$\delta_{\text{ср}} = \delta + \frac{1}{3} \cdot (\delta_{\max} - \delta) = 2,45 + \frac{1}{3} \cdot (3,68 - 2,45) = 2,86 \text{ мм.}$$

На рис. 11 приведена конструкция полюса ротора синхронной машины.

3.5. Высота полюсного наконечника определяется по рис. 12, согласно которому при  $\tau = 238$  мм,  $h_p = 30$  мм.

3.6. Ширина полюсного наконечника (42):

$$b_p = \alpha \cdot \tau = 0,71 \cdot 238 = 169 \text{ мм.}$$

3.7. Высота сердечника полюса (46):

$$h_m \approx 16 + 33,5 \cdot \sqrt[4]{\tau} = 16 + 33,5 \cdot \sqrt[4]{238} = 148 \text{ мм.}$$

3.8. Длина сердечника полюса  $l_m$  и полюсного наконечника  $l_p$ :

$$l_m = l_p = l_1 = 394 \text{ мм.}$$

3.9. Расчетная длина сердечника полюса (43):

$$l'_m = l_m + l_{\text{ш}} = 394 + 16 = 410 \text{ мм,}$$

где  $l_{\text{ш}} = 16 \text{ мм}$ .

3.10. Коэффициент рассеяния полюсов ротора (предварительное значение) (41):

$$\sigma'_m = 1 + \frac{350 \cdot k_{\sigma} \cdot \delta_{\text{ср}}}{\tau^2} = 1 + \frac{350 \cdot 7 \cdot 2,86}{238^2} = 1,12,$$

где  $k_{\sigma} = 7$  при  $h_p = 30$ .

3.11. Ширина сердечника полюса (40):

$$b_m = \frac{\alpha_i \cdot B'_{\delta} \cdot \tau \cdot l_i \cdot \sigma'_m}{B'_m \cdot k_c \cdot l'_m} = \frac{0,66 \cdot 0,9 \cdot 238 \cdot 334 \cdot 1,12}{1,4 \cdot 0,95 \cdot 410} = 97 \text{ мм,}$$

где  $B'_m$  – предварительное допустимое значение магнитной индукции в основании сердечника полюса,  $B'_m = 1,4 \text{ Тл}$ .

3.12. Длина обода (47):

$$l_{\text{об}} = l_m + \Delta l = 394 + 60 = 454 \text{ мм,}$$

где  $\Delta l = 60 \text{ мм}$ .

3.13. Высота обода (48):

$$h_{\text{об}} = \frac{\sigma'_m \cdot \alpha_i \cdot B'_{\delta} \cdot \tau \cdot l_i}{2 \cdot B'_{\text{об}} \cdot l_{\text{об}}} = \frac{1,12 \cdot 0,66 \cdot 0,9 \cdot 238 \cdot 319}{2 \cdot 1,2 \cdot 454} = 48 \text{ мм,}$$

где  $B'_{\text{об}}$  – предварительное значение магнитной индукции в ободу  $B'_{\text{об}} = 1,2 \text{ Тл}$ .

#### 4. Расчет пусковой обмотки

4.1. Число стержней пусковой обмотки на один полюс принимаем  $N_c = 7$  (см. раздел 6).

4.2. Поперечное сечение одного стержня (49):

$$S'_c = \frac{k_{\text{пк}} \cdot \tau \cdot A_1}{N_c \cdot \Delta_1} = \frac{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 238 \cdot 431 \cdot 10^2}{7 \cdot 5,41} = 81,3 \text{ мм}^2,$$

где  $k_{\text{пк}} = 0,3 \cdot 10^{-3}$ .

4.3. Диаметр стержня (50):

$$d_c \approx 1,13 \cdot \sqrt{S'_c} = 1,13 \cdot \sqrt{81,3} = 10,2 \text{ мм},$$

принимаем  $d_c = 10,5$  мм, тогда сечение стержня пусковой обмотки:

$$S_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10,5^2}{4} = 86,5 \text{ мм}^2.$$

4.4. Длина стержня пусковой обмотки (51):

$$l_{ст} = l_p + (0,2 \div 0,4) \cdot \tau = 394 + 0,3 \cdot 238 = 465 \text{ мм}.$$

4.5. Зубцовый шаг на полюсном наконечнике ротора (52):

$$t_2 = \frac{(b_p - d_c - 2 \cdot e)}{N_c - 1} = \frac{169 - 10,5 - 2 \cdot 3}{7 - 1} = 25,41 \text{ мм}.$$

4.6. Проверка условий (53):

$$t_2 \geq 0,8 \cdot t_1, 25,41 > 31,7 \cdot 0,8, 25,41 > 25,36;$$

$$(N_c - 1) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \right] > 0,75;$$

$$6 \cdot [1 - 0,8] > 0,75; 1,2 > 0,75.$$

4.7. Пазы на роторе принимаем круглыми полузакрытыми, диаметр паза (54):

$$d_{п2} = d_c + \Delta_{пр} = 10,5 + 0,1 = 10,6 \text{ мм},$$

ширина шлица  $b_{ш2} = 4$  мм, высота шлица  $h_{ш2} = 2$  мм.

4.8. Сечение короткозамыкающего сегмента (55):

$$S_{к.з} = a_k \cdot b_k \approx 0,5 \cdot N_c \cdot S_c = 0,5 \cdot 7 \cdot 86,5 = 302,75 \text{ мм}^2.$$

По приложению 2 принимаем медную шину с размерами  $a_k \geq \frac{2}{3} \cdot d_c = 7$  мм и  $b_k = 45$  мм, сечение шины  $S_{к.з} = 314,1 \text{ мм}^2$ .

## 5. Расчет магнитной цепи

5.1. Полезный магнитный поток (56):

$$\Phi = \frac{E_{10}}{4 \cdot k_B \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{об1}} = \frac{3464}{4 \cdot 1,15 \cdot 50 \cdot 360 \cdot 0,91} = 0,046 \text{ Вб},$$

где  $E_{10} = U_{\text{ном}} = 3464 \text{ В}$ , по рис. 1 при  $\frac{\delta_{\text{max}}}{\delta} = 1,5$   $\alpha = 0,71$  и  $\frac{\delta}{\tau} = 0,01$ , принимаем  $k_B = 1,15$  и  $\alpha_i = 0,66$ .

5.2. Магнитная индукция в воздушном зазоре (57):

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_i} = \frac{0,046 \cdot 10^6}{0,66 \cdot 238 \cdot 334} = 0,88 \text{ Тл.}$$

5.3. Коэффициент воздушного зазора (59):

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1,22 \cdot 1,08 = 1,32,$$

где  $k_{\delta 1}$  – коэффициент воздушного зазора статора

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1 + 10 \cdot \delta_{\text{cp}}}{t_1 - b_{\text{п1}} + 10 \cdot \delta_{\text{cp}}} = \frac{31,7 + 10 \cdot 2,86}{31,7 - 11 + 10 \cdot 2,86} = 1,22;$$

$k_{\delta 2}$  – коэффициент воздушного зазора ротора

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2 + 10 \cdot \delta_{\text{cp}}}{t_2 - b_{\text{м2}} + 10 \cdot \delta_{\text{cp}}} = \frac{25,4 + 10 \cdot 2,86}{25,4 - 4 + 10 \cdot 2,86} = 1,08.$$

5.4. Магнитное напряжение воздушного зазора (58):

$$F_{\delta} = 0,8 \cdot B_{\delta} \cdot \delta_{\text{cp}} \cdot k_{\delta} \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,88 \cdot 2,86 \cdot 1,32 \cdot 10^3 = 2658 \text{ А.}$$

5.5. Магнитное напряжение зубцового слоя статора. Для сердечника статора выбрана тонколистовая холоднокатаная электротехническая сталь марки 2013 толщиной 0,5 мм. Ширина зубца в наиболее узком месте (62):

$$b_{z1\text{min}} = t_1 - b_{\text{п1}} = 31,7 - 11 = 20,7 \text{ мм.}$$

Магнитная индукция в наименьшем сечении зубца (63):

$$B_{z1\text{max}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{k_{c1} \cdot b_{z1\text{min}}} = \frac{0,88 \cdot 31,7}{0,95 \cdot 20,7} = 1,42 \text{ Тл.}$$

Так как  $B_{z1\text{max}} < 1,8 \text{ Тл}$ , то расчет магнитного напряжения ведем по магнитной индукции в сечении зубца на высоте 1/3 от его наиболее узкого места, где ширина зубца равна (64)

$$b_{z1(1/3)} = \frac{\pi \cdot [D_1 + (2/3) \cdot h_{z1}]}{z_1} - b_{\text{п1}} = \frac{\pi \cdot [908 + (2/3) \cdot 70]}{90} - 11 = 22,3 \text{ мм.}$$

Магнитная индукция в сечении зубца на высоте 1/3 (65):

$$B_{z1(1/3)} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{k_{c1} \cdot b_{z1(1/3)}} = \frac{0,88 \cdot 31,7}{0,95 \cdot 22,3} = 1,32 \text{ Тл.}$$

Напряженность поля в зубце определяют по приложению 5. При  $B_{z1(1/3)} = 1,32 \text{ Тл}$ ,  $H_{z1} = 220 \text{ А/м}$ .

Магнитное напряжение зубцового слоя статора (75):

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \cdot 10^{-3} = 220 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 15,4 \text{ А.}$$

5.6. Магнитное напряжение зубцового слоя ротора. Полюсы полюсными наконечниками выполнены из конструкционной стали марки Ст. 3 толщиной 1 мм. Ширина зубца на расстоянии 1/3 от поверхности полюсного наконечника определяется (76):

$$\begin{aligned} b_{z2(1/3)} &= \frac{D_1 - 2 \cdot \delta - (2/3) \cdot h_{z2}}{D_1 - 2 \cdot \delta} \cdot t_2 - 0,94 \cdot d_{п2} = \\ &= \frac{908 - 2 \cdot 2,45 - (2/3) \cdot 12,7}{908 - 2 \cdot 2,45} \cdot 25,4 - 0,94 \cdot 10,7 = 15,1 \text{ мм,} \end{aligned}$$

где  $h_{z2}$  – высота зубца ротора,

$$h_{z2} = d_{п2} + h_{ш2} = 10,7 + 2 = 12,7, \quad h_{ш2} = 2 \text{ мм.}$$

Магнитная индукция в зубце ротора (77):

$$B_{z2(1/3)} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_i}{b_{z2(1/3)} \cdot l_m \cdot k_{c2}} = \frac{0,88 \cdot 25,4 \cdot 334}{15,1 \cdot 394 \cdot 0,95} = 1,32 \text{ Тл,}$$

где  $k_{c2} = 0,95$ .

Напряженность поля в зубце ротора при магнитной индукции  $B_{z2(1/3)} = 1,32 \text{ Тл}$  по приложению 8 равна  $H_{z2} = 1145 \text{ А}$ .

Магнитное напряжение зубцового слоя ротора (78):

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot h_{z2} \cdot 10^{-3} = 1145 \cdot 12,7 \cdot 10^{-3} = 14,5 \text{ А.}$$

5.7. Магнитное напряжение спинки статора.

Магнитная индукция в спинке статора (79):

$$B_{c1} = \frac{0,5 \cdot \alpha_i \cdot \tau \cdot B_{\delta}}{k_{c1} \cdot h_{c1}} = \frac{0,5 \cdot 0,66 \cdot 238 \cdot 0,88}{0,95 \cdot 66} = 1,1 \text{ Тл.}$$

Напряженность поля в спинке статора определяется из приложения 5 при  $B_{c1} = 1,1$  Тл,  $H_{c1} = 125$  А.

Длина средней силовой линии в спинке статора (80):

$$L_c = \frac{\pi}{2 \cdot p} \cdot (D_{H1} - h_{c1}) = \frac{\pi}{12} \cdot (1180 - 66) = 292 \text{ мм.}$$

Магнитное напряжение спинки статора (81):

$$F_{c1} = \xi \cdot L_{c1} \cdot H_{c1} \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 125 \cdot 292 \cdot 10^{-3} = 18 \text{ А,}$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение магнитной индукции в спинке статора, берется из рис. 15,  $\xi = 0,5$ .

Коэффициент магнитного насыщения сердечника статора и зубцового слоя ротора (82):

$$k_{\mu 1} = \frac{F_{\delta zc}}{2 \cdot F_{\delta}} = \frac{5394}{5316} = 1,015,$$

где  $F_{\delta zc} = 2 \cdot F_{\delta} + 2 \cdot F_{z1} + 2 \cdot F_{z2} + F_{c1} = 2 \cdot 2658 + 2 \cdot 15,4 + 2 \cdot 14,5 + 18 = 5394$  А.

5.8. Магнитное напряжение полюса.

Коэффициент магнитного рассеяния полюсов ротора (84):

$$\sigma_m = \sigma'_{mk} \cdot k_{\mu 1} = 1,12 \cdot 1,015 = 1,137.$$

Магнитная индукция в основании полюсов (85):

$$B_m = \frac{\Phi \cdot \sigma_m \cdot 10^6}{l'_m \cdot b_m \cdot k_{ct}} = \frac{0,046 \cdot 1,137 \cdot 10^6}{410 \cdot 97 \cdot 0,95} = 1,384 \text{ Тл.}$$

Напряженность поля в полюсе при  $B_m = 1,384$  Тл по приложению 8,  $H_m = 1,384$  А.

Магнитное напряжение полюса (86):

$$F_m = H_m \cdot (h_m + h_p) \cdot 10^{-3} = 1420 \cdot (148 + 30) \cdot 10^{-3} = 253 \text{ А.}$$

5.9. Магнитное напряжение обода.

Магнитная индукция в ободу ротора (87):

$$B_{об} = \frac{\Phi \cdot \sigma_m \cdot 10^6}{2 \cdot l_{об} \cdot h_{об} \cdot k_{ct}} = \frac{0,046 \cdot 1,14 \cdot 10^6}{2 \cdot 454 \cdot 48 \cdot 0,95} = 1,27 \text{ Тл.}$$

Напряженность поля в обode при  $B_{об} = 1,27$  Тл по приложению 8,  $H_{об} = 992$  А.

Длина силовой линии в обode (88):

$$L_{об} = \frac{\pi}{2 \cdot p} \cdot [D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot (h_m + h_p) - h_{об}] = \frac{\pi}{12} \times \\ \times [908 - 2 \cdot 2,45 - 2 \cdot (148 + 30) - 48] = 131 \text{ мм.}$$

Магнитное напряжение обода (89):

$$F_{об} = H_{об} \cdot L_{об} \cdot 10^{-3} = 130 \text{ А.}$$

5.10. Магнитное напряжение стыка между полюсом и ободом (90):

$$F_{m\ об} \approx 250 \cdot B_m = 250 \cdot 1,39 = 348 \text{ А.}$$

5.11. Магнитное напряжение ротора (без зубцового слоя):

$$F'_p = 2 \cdot F_m + F_{об} + 2 \cdot F_{m\ об} = 2 \cdot 258 + 130 + 2 \cdot 347 = 1330 \text{ А.}$$

5.12. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на пару полюсов в режиме холостого хода при ЭДС  $E_{10} = U_{1ном} = 3464$  В:

$$F_{ов} = F_{\delta zc} + F'_p = 2 \cdot F_{\delta} + 2 \cdot F_{z1} + 2 \cdot F_{z2} + F_{cl} + 2 \cdot F_m + F_{об} + 2 \cdot F_{m\ об} = \\ = 5394 + 1330 = 6724 \text{ А.}$$

Задавшись рядом относительных значений ЭДС статора  $E_{10*} = \frac{E_{10}}{U_{1ном}}$ , например, 0,5; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3, рассчитываем для каждого из этих значений  $F_{ов*}$  и строим характеристику холостого хода синхронного двигателя в относительных единицах  $E_{10*} = f(F_{ов*})$ . За базовое значение относительной МДС  $F_{ов*}$  принята МДС, соответствующая ЭДС статора  $E_{10} = U_{1ном}$ .

Результаты расчета магнитной цепи синхронного двигателя при различных относительных значениях ЭДС  $E_{10}$  приведены в таблице 21:

Таблица 21

Параметр	Значения параметров при ЭДС $E_{10*}$				
	0,5	1	1,1	1,2	1,3
$E_{10}$ , В	1732	3464	3810	4157	4503
$\Phi$ , Вб	0,023	0,046	0,0506	0,0552	0,0598
$B_{\delta}$ , Тл	0,44	0,88	0,97	1,06	1,14
$F_{\delta}$ , А	1329	2658	2924	3190	3455



Параметр	Значения параметров при ЭДС $E_{10}^*$				
	0,5	1	1,1	1,2	1,3
$F_{z1}, A$	5,2	15,4	30	110	260
$F_{z2}, A$	4,1	14,5	23	47	100
$F_{c1}, A$	9,8	18	22	32	63
$F_{\delta zc} = 2 \cdot F_{\delta} + 2 \cdot F_{z1} + 2 \cdot F_{z2} + F_{c1}, A$	2686	5394	5976	6726	7631
$k_{\mu 1} = \frac{F_{\delta zc}}{2 \cdot k F_{\delta}}$	1,01	1,015	1,022	1,05	1,11
$\sigma_m = \sigma'_{mk} \cdot k_{\mu 1}$	1,13	1,14	1,15	1,18	1,24
$\Phi_m = \Phi \cdot \sigma_m, Bб$	0,026	0,053	0,058	0,065	0,074
$B_m, Tл$	0,69	1,39	1,54	1,72	1,96
$F_m, A$	61	253	513	1415	4361
$F_{об}, A$	41	130	195	445	1441
$F_{m об}, A$	172	347	385	430	490
$F'_p = 2 \cdot F_m + F_{об} + 2 \cdot F_{m об}, A$	507	1330	1991	4135	11143
$F_{об} = F_{\delta zc} + F'_p, A$	3193	6724	7967	10861	18774
$F_{об}^* = \frac{F_{об}}{F_{об.ном}}$	0,47	1	1,18	1,61	2,8
$F_{\delta zc}^* = \frac{F_{\delta zc}}{F_{об.ном}}$	0,4	0,8	0,89	1	1,14
$F'_{p*} = \frac{F'_p}{F_{об.ном}}$	0,07	0,2	0,29	0,61	1,66
$\Phi_{m*} = \frac{\Phi_m}{\Phi_H}$	0,56	1,13	1,26	1,41	1,61

## 6. Параметры обмотки статора

6.1. Средняя длина витка обмотки статора (93):

$$l_{1cp} = 2 \cdot (l_1 + l_{1л}) + 40 = 2 \cdot (394 + 334) + 40 = 1596 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned}
 l_{1л} &= \frac{t_1 \cdot y_1}{\sqrt{1 - [(b_{п1} + 3,5)/t_1]^2}} + h_{z1} + 50 = \\
 &= \frac{31,7 \cdot 6}{\sqrt{1 - [(11 + 3,5)/31,7]^2}} + 70 + 50 = 334 \text{ мм}.
 \end{aligned}$$

6.2. Активное сопротивление одной фазы обмотки статора при расчетной температуре 75 °С (92):

$$r_1 = \frac{\rho_{cu} \cdot \omega_1 \cdot l_{\text{ср}} \cdot 10^3}{n_{\text{эл}} \cdot a_1 \cdot S_{1\text{эл}}} = \frac{21,3 \cdot 10^{-6} \cdot 360 \cdot 1496}{1 \cdot 1 \cdot 10,51} = 1,09 \text{ Ом},$$

$$r_{1*} = 1,09 \cdot \left( \frac{56,9}{3464} \right) = 0,0179.$$

Проверка правильности определения  $r_{1*}$ :

$$r_{1*} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A_1 \cdot \Delta_1 \cdot l_{\text{ср1}}}{114 \cdot 10^4 \cdot m_1 \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{НОМ}}} = \frac{\pi \cdot 908 \cdot (431 \cdot 5,41) \cdot 1496}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 3464 \cdot 56,9} = 0,0143.$$

После приведения  $r_{*75\text{ °С}}$  к  $r_{*20\text{ °С}}$  по (97), получим:

$$r_{1*} = 0,0174 \cdot 0,82 = 0,0143.$$

Следовательно,  $r_1$  определено правильно.

6.3. Коэффициент магнитной проводимости между стенками паза (100):

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{h_1 - h_1''}{3 \cdot b_{\text{п1}}} \cdot k_{\beta} + \frac{h_1' + h_{\text{к1}} + h_{\text{ш1}}}{b_{\text{п1}}} \cdot k'_{\beta} + \frac{h_1''}{4 \cdot b_{\text{п1}}} = \frac{61,3 - 6,7}{3 \cdot 12,2} \cdot 0,88 +$$

$$+ \frac{6,85}{12,2} \cdot 0,85 + \frac{6,7}{4 \cdot 12,2} = 1,31 + 0,48 + 0,14 = 1,93.$$

6.4. Другая составляющая коэффициента удельной проводимости паза  $\lambda_{\text{п1}}$ , пропорциональная магнитной проводимости по коронкам зубцов, равна (101):

$$\lambda_{\text{к}} = [\alpha_i \cdot \lambda'_{\text{к}} + (0,22 + 0,32 \cdot \sqrt{\frac{t_1 - b_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}}}) \cdot (1 - \alpha_i)] \cdot k'_{\beta} =$$

$$= [0,66 \cdot 0,07 + (0,22 + 0,32 \cdot \sqrt{\frac{31,7 - 12,2}{12,2}}) \cdot (1 - 0,66)] \cdot 0,85 = 0,22.$$

6.5. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния (99):

$$\lambda_{\text{п1}} = \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{к}} = 1,93 + 0,22 = 2,15.$$

6.6. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния по (102):

$$\lambda_{\text{дл}} \approx \frac{0,03 \cdot \tau \cdot \alpha_i}{k_{\delta} \cdot \delta_{\text{ср}} \cdot q_1} = \frac{0,03 \cdot 238 \cdot 0,66}{2,86 \cdot 1,32 \cdot 2,5} = \frac{4,71}{9,44} = 0,5.$$

6.7. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей обмотки статора (103):

$$\lambda_{\text{лп}} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{\text{лп}} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{2,5}{394} \cdot (334 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 238) = 0,00215 \cdot 212 = 0,46.$$

6.8. Коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки статора:

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{пл}} + \lambda_{\text{дл}} + \lambda_{\text{лп}} = 2,15 + 0,5 + 0,46 = 3,11.$$

6.9. Индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки статора (104):

$$X_1 = \frac{1,58 \cdot f_1 \cdot l_1 \cdot \omega_1^2}{p \cdot q_1 \cdot 10^8} \cdot \lambda_1 = \frac{1,58 \cdot 50 \cdot 394 \cdot 360^2}{6 \cdot 2,5 \cdot 10^8} \cdot 3,11 = 8,36 \text{ Ом.}$$

6.10. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в относительных единицах (105):

$$X_{1*} = X_1 \cdot \frac{I_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = 8,36 \cdot \frac{56,9}{3464} = 0,137.$$

Проверка правильности определения  $X_{1*}$  (о. е.):

$$\begin{aligned} X_{1*} &= \frac{0,39 \cdot (D_1 \cdot A_1)^2 \cdot l_1 \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-7}}{m_1 \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot z_1} = \\ &= \frac{0,39 \cdot (908 \cdot 431)^2 \cdot 394 \cdot 3,11 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 3464 \cdot 56,9 \cdot 90} = 0,137. \end{aligned}$$

Следовательно, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора определено правильно.

6.11. Определяем МДС обмотки статора на пару полюсов при номинальной нагрузке (107):

$$F_{a \text{ ном}} = \frac{0,9 \cdot m_1 \cdot I_{\text{ном}} \cdot \omega_1 \cdot k_{\text{обл}}}{p} = \frac{0,9 \cdot 3 \cdot 56,9 \cdot 360 \cdot 0,91}{6} = 8388 \text{ А.}$$

6.12. Индуктивное сопротивление взаимной индукции по продольной оси в относительных единицах (106):

$$X_{ad} = \frac{k_{ad} \cdot F_{a \text{ ном}}}{2 \cdot k_{\mu 0,5} \cdot F_{\delta \text{ ном}}} = \frac{0,85 \cdot 8388}{2 \cdot 1,068 \cdot 2658} = 1,25.$$

По рис. 19, б при  $\alpha = 0,71$  имеем  $k_{ad} = 0,85$ ,  $k_{aq} = 0,4$ .  
Коэффициент магнитного насыщения при  $F_{\text{об}0,5} = 3193$  (108):

$$k_{\mu 0,5} = \frac{F_{\text{об}0,5}}{2 \cdot (F_{\delta 0,5} + F_{m10,5})} = \frac{3193}{2 \cdot (1323 + 172)} = 1,068.$$

6.13. Индуктивное сопротивление взаимной индукции по поперечной оси в (о. е.) (109):

$$X_{aq*} = \frac{k_{aq} \cdot F_{a \text{ ном}}}{2k_{\mu 0,5} \cdot F_{\delta \text{ ном}}} \cdot \frac{1+k_{\delta}}{2} = \frac{0,4 \cdot 8388}{2 \cdot 1,068 \cdot 2658} \cdot \frac{1+1,32}{2} = 0,68.$$

6.14. Синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси в относительных единицах (110):

$$X_{d*} = X_{ad*} + X_{1*} = 1,25 + 0,137 = 1,387.$$

6.15. Синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси в относительных единицах (111):

$$X_{q*} = X_{aq*} + X_{1*} = 0,68 + 0,137 = 0,817.$$

## 7. Определение МДС обмотки возбуждения при нагрузке

7.1. По данным таблицы 21 строим характеристики намагничивания (рис. 34)

$$E_{10*} = f(F_{\delta zc*}), \Phi_{m*} = f(F'_{p*}), \Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta zc*}).$$

7.2. Строим векторную диаграмму тока и ЭДС при номинальной нагрузке двигателя (рис. 35).

Принимаем масштаб напряжений  $m_U = 25$  В/мм, тогда длина вектора напряжений  $U_1 = \frac{U_1}{m_U} = \frac{3464}{25} = 138,6$  мм, а вектор падения

напряжения в индуктивном сопротивлении  $\left( -\frac{j \cdot I_{\text{НОМ}} \cdot X_1}{m_U} \right) =$   
 $= \frac{56,9 \cdot 8,36}{25} = 19 \text{ мм.}$

Что касается вектора падения напряжения в активном сопротивлении, то в принятом масштабе  $m_U$  его длина составляет менее 3 мм, поэтому на векторной диаграмме этот вектор не показан.

Угол  $\varphi_{\text{НОМ}} = \arccos 0,9 = 26^\circ$ . После соответствующих построений определяем вектор ЭДС двигателя при нагрузке:

$$E_{1\text{н}} = 149 \cdot 25 = 3725 \text{ В.}$$

В относительных единицах эта ЭДС  $E_{1\text{н}^*} = \frac{3725}{3464} = 1,076$ . Далее по графику  $E_{10^*} = f(k_{\mu})$  (рис. 33) определяем коэффициент магнитного насыщения  $k_{\mu 1}$ , соответствующий ЭДС  $E_{1^*} = 1,076$ , т. е.  $k_{\mu 1} = 1,027$ . Пользуясь этим значением коэффициента насыщения по рис. 22 определяем коэффициенты  $\tilde{\chi}_d = 0,97$ ,  $\tilde{\chi}_q = 0,96$ ,  $\tilde{k} = 5 \cdot 10^{-4}$ .

7.3. Определяем МДС (114):

$$\frac{F'_{aq^*}}{\cos \psi_1} = \tilde{\chi}_q \cdot k_{aq} \cdot F_{a \text{НОМ}^*} = 0,96 \cdot 0,4 \cdot 1,25 = 0,48,$$

где  $F_{a \text{НОМ}^*} = \frac{F_{1\text{НОМ}}}{F_{\text{ОВ}}} = \frac{8388}{6724} = 1,25$ ;  $k_{aq} = 0,4$  (см. рис. 19).

7.4. Отложив на оси абсцисс графика  $E_{10^*} = f(F_{\delta zc^*})$  (рис. 34) величину  $\frac{F'_{aq^*}}{\cos \psi_1} = 0,48$ , определим  $\frac{E_{aq^*}}{\cos \psi_1} = 0,63$  или, переходя к абсолютным единицам измерения, получим  $\frac{E_{aq}}{\cos \psi_1} = 0,63 \cdot 3464 = 2182 \text{ В.}$

Отложив на продолжении вектора  $(-j \cdot X_1 \cdot I_1)$ , вектор  $\frac{E_{aq}}{\cos \psi_1}$  длиной

$\frac{2189}{25} = 87 \text{ мм}$ , получим на векторной диаграмме точку  $Q$ . Проведя прямую  $OQ$ , получим угол  $\psi_1 = 57^\circ$ .

При этом  $\sin \psi_1 = 0,83$ ,  $\cos \psi_1 = 0,545$ .

7.5. Опустив перпендикуляр из конца вектора  $(-j \cdot X_1 \cdot I_1)$  на линию  $OQ$ , определяем векторы ЭДС:

$$E_{2d} = 137 \cdot 25 = 3425 \text{ В и } E_{aq} = 50 \cdot 25 = 1250 \text{ В.}$$

7.6. Отложив на оси ординат графика  $E_{10^*} = f(F_{\delta zc^*})$  значение  $E_{2d^*} = \frac{E_{2d}}{E_{1ном}} = \frac{3425}{3464} = 0,99$ , получим соответствующее значение МДС, равное  $F_{2d^*} = 0,8$ .

7.7. Магнитодвижущая сила продольной реакции якоря с учетом размагничивающего действия МДС реакции якоря по поперечной оси (116):

$$\begin{aligned} F_{ad}'' &= F_{аном} (k_{ad} \cdot \tilde{\chi}_d \cdot \sin \psi_1 + \tilde{k} \cdot \frac{\tau}{\delta} \cdot \cos \psi_1) = \\ &= 1,25 \cdot (0,85 \cdot 0,98 \cdot 0,83 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{238}{2,45} \cdot 0,545) = 0,88. \end{aligned}$$

7.8. Отложив на оси абсцисс сумму  $F_{2d}^* + F_{ad}''$  из характеристики  $\Phi_{\sigma^*} = f(F_{\delta zc^*})$ , находим поток рассеяния  $\Phi_{\sigma^*}$  в основании ротора при нагрузке машины,  $\Phi_{\sigma^*} = 0,34$ .

7.9. По потоку полюса  $\Phi_{m^*} = \Phi_{2d^*} + \Phi_{\sigma^*}$  из характеристики  $\Phi_{m^*} = f(F_p')$  определяют сумму магнитных напряжений ротора  $F_{p^*}'$ :

$$\Phi_{m^*} = \Phi_{2d^*} + \Phi_{\sigma^*} = 1 + 0,34 = 1,34; F_{p^*}' = 0,4.$$

7.10. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения в относительных единицах при номинальной нагрузке (117):

$$F_{вн^*} = F_{2d^*} + F_{ad}'' + F_{p^*}' = 0,8 + 0,88 + 0,40 = 2,08.$$

7.11. МДС обмотки возбуждения на пару полюсов в физических единицах (118):

$$F_{вн} = F_{вн^*} \cdot F_{ов.ном} = 2,08 \cdot 6724 = 13986 \text{ А.}$$

## 8. Расчет обмотки возбуждения

8.1. Принимаем обмотку возбуждения из однослойных полюсных катушек, лобовые части которых имеют форму полуокружности. Изоляция класса нагревостойкости  $B$ .

8.2. Средняя длина витка катушки (119):

$$l_{в.ср} = 2(l_m - 2 \cdot c) + \pi \cdot (b_m + 2 \cdot \delta_u + b') = \\ = 2 \cdot (394 - 2 \cdot 12,5) + 3,14 \cdot (97 + 2 \cdot 1,5 + 14) = 763 + 358 = 1121 \text{ мм},$$

где  $\delta_u = 1,5 \text{ мм}$ ;  $c = 12,5 \text{ мм}$ ;  $b' = 0,059 \cdot \tau = 0,059 \cdot 238 = 14 \text{ мм}$ .

8.3. Для питания обмотки возбуждения двигателя берем возбуждательное устройство ТВУ – 65 – 320 (номинальное напряжение 65 В, ток 320 А).

Напряжение непосредственно на обмотке возбуждения (122):  
 $U_B = U_{B \text{ ном}} - 2 = 65 - 2 = 63 \text{ В}$ .

8.4. Предварительное значение сечения медного провода полюсной катушки (121):

$$S'_B = \frac{\rho' \cdot p \cdot F'_{вн} \cdot l_{в.ср} \cdot 10^3}{U_B} = \frac{25,6 \cdot 10^{-9} \cdot 6 \cdot 15385 \cdot 1121 \cdot 10^3}{63} = 42 \text{ мм}^2,$$

где  $\rho' = 25,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  для  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ , класс изоляции В.

$$F'_{вн} = 1,1 \cdot F_{вн} = 1,1 \cdot 13986 = 15385 \text{ А}.$$

8.5. Ток возбуждения (123):

$$I_{вн} = S'_B \cdot \Delta'_B = 42 \cdot 5 = 210 \text{ А}.$$

8.6. Число витков в катушке возбуждения (124):

$$\omega_B = \frac{F_{вн}}{2 \cdot I_{вн}} = \frac{13986}{2 \cdot 210} = 33.$$

8.7. Меньший размер прямоугольного провода (125):

$$a = \frac{h_m - \delta_{\Pi}}{\omega_B + 1} - \delta_a = \frac{148 - 14}{33 + 1} - 0,4 = 3,54 \text{ мм},$$

где  $\delta_{\Pi}$  – суммарная толщина прокладок на обode и под полюсным наконечником  $\delta_{\Pi} = 14 \text{ мм}$ ;  $\delta_a = 0,4 \text{ мм}$  (табл. 9).

8.8. Большой размер прямоугольной проволоки (126):

$$b = \frac{S_B}{a} = \frac{42}{3,54} = 11,86 \text{ мм}.$$

8.9. По приложению 2 принимаем провод сечением  $S_B = 43,83 \text{ мм}^2$  с размерами  $a \times b = 3,55 \times 12,5 \text{ мм}$ .

8.10. Расстояние между катушками соседних полюсов (127):

$$x = \frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_p - 2 \cdot h_m)}{2 \cdot p} - b_m - 2 \cdot \delta_u - 2 \cdot b =$$

$$= \frac{3,14 \cdot (908 - 2 \cdot 2,45 - 2 \cdot 30 - 2 \cdot 148)}{12} - 97 - 2 \cdot 1,5 - 2 \cdot 12,71 = 17,7 \text{ мм.}$$

8.11. Фактическая плотность тока в катушке возбуждения (128):

$$\Delta_B = \frac{I_{\text{ВН}}}{S_B} = \frac{210}{43,83} = 4,8.$$

8.12. Превышение температуры полюсной катушки (129):

$$\Delta\theta_B = \frac{0,3 \cdot (2,8 + l_1 / \tau) \cdot b \cdot \Delta_B^2}{1,6 \cdot \sqrt{\vartheta_2}} = \frac{0,3 \cdot (2,8 + 394 / 238) \cdot 12,5 \cdot 5^2}{1,6 \cdot \sqrt{23,6}} = 54 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$54 \text{ }^\circ\text{C} < 75 \text{ }^\circ\text{C},$$

где  $\vartheta_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n_1}{60 \cdot 10^3} = \frac{3,14 \cdot 902 \cdot 500}{60 \cdot 10^3} = 23,6 \text{ м/с},$

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta_{\text{ср}} = 908 - 2 \cdot 3 = 902 \text{ мм.}$$

8.13. Уточненное значение высоты полюса (131):

$$h_m = (a + \delta_a) \cdot (\omega_B + 1) + \delta_{\text{п}} = (3,55 + 0,4) \cdot (33 + 1) + 14 = 148 \text{ мм.}$$

Так как расхождение с ранее выбранной высотой 148 мм составляет 4,5 %, то пересчет магнитного напряжения полюса не производим.

8.14. Активное сопротивление обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и  $\theta = 130 \text{ }^\circ\text{C}$  (132):

$$r_{\text{в}\theta} = \rho_{130} \cdot \frac{2 \cdot p \cdot \omega_B \cdot l_{\text{вср}} \cdot 10^3}{S_B} = 25,6 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{12 \cdot 33 \cdot 1121 \cdot 10^3}{43,83} = 0,259 \text{ Ом.}$$

8.15. Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и температуре  $\theta = 130 \text{ }^\circ\text{C}$  (133):

$$U'_{\text{ВН}} = r_{\text{в}130} \cdot I_{\text{ВН}} = 0,259 \cdot 210 = 54,4 \text{ В.}$$

8.16. Коэффициент запаса возбуждения (134):

$$k_3 = \frac{U_{\text{ВН}}}{U'_{\text{ВН}} + \Delta U_{\text{щ}}} = \frac{65}{54,4 + 2} = \frac{65}{56,4} = 1,15.$$



## 9. Параметры обмоток и постоянные времени

9.1. Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения (135):

$$X_{B^*} = 1,27 \cdot k_{ad} \cdot X_{ad^*} \cdot \left( 1 + \frac{4 \cdot k_{\mu 0,5} \cdot F_{\delta} \cdot l'_m \cdot \sum \lambda}{\Phi_{\delta}} \right) = 1,27 \cdot 0,85 \cdot 1,25 \times \\ \times \left( 1 + \frac{4 \cdot 1,068 \cdot 2658 \cdot 410 \cdot 1,38 \cdot 10^{-9}}{0,046} \right) = 1,54,$$

$$\text{где } \sum \lambda = \lambda_{pl} + \frac{\lambda_{ml}}{1,53} + \frac{\lambda_{mv}}{2,65} = \left( 0,71 + \frac{0,96}{1,53} + \frac{0,1}{2,65} \right) \cdot 10^{-6} = 1,38 \cdot 10^{-6},$$

$$\lambda_{ml} = \frac{0,55 \cdot h_m \cdot 10^{-6}}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2 \cdot p} \cdot (h_m + 2 \cdot h_p + 2 \cdot \delta)} = \\ = \frac{0,55 \cdot 148 \cdot 10^{-6}}{238 - 97 - \frac{3,14}{12} \cdot (148 + 2 \cdot 30 + 2 \cdot 2,45)} = 0,96 \cdot 10^{-6},$$

$$\lambda_{pl} = \left( 1,4 \cdot \left( \frac{d_t}{a'_p} - 0,25 \right) + 0,55 \cdot \left( \frac{c_p}{a'_p} + 0,2 \right) - 0,4 \cdot \left( \frac{c_p}{a'_p} - 0,5 \right)^2 \right) \cdot 10^{-6} = \\ = (0,26 + 0,46 - 0,01) \cdot 10^{-6} = 0,71 \cdot 10^{-6},$$

$$c_p = \frac{(b_p - b_m)}{2} = \frac{(169 - 97)}{2} = 36,$$

$$a'_p = \tau - b_p - \frac{\pi \cdot d_t}{p} = 238 - 169 - \frac{3,14 \cdot 24,6}{6} = 56,1,$$

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4 \cdot D_1} = 30 + 2,45 - \frac{169^2}{4 \cdot 908} = 24,6,$$

$$\lambda_{mv} = 0,37 \cdot \frac{b_m}{l'_m} \cdot 10^{-6} = 0,37 \cdot \frac{97}{410} = 0,1 \cdot 10^{-6}.$$

9.2. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения (141):

$$X_{B\delta^*} = X_{B^*} - X_{ad^*} = 1,54 - 1,25 = 0,29.$$

9.3. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой обмотки по продольной оси (142):

$$X_{kd*} = 7,9 \cdot \frac{F_{ан}}{2 \cdot \Phi_H} \cdot \frac{10^{-6}}{1 - k_\delta} \cdot \left[ \frac{l_p}{N_c} \cdot (\lambda_\delta + \lambda_{ду}) + \lambda_{rd} \right] = 7,9 \cdot \frac{8388}{2 \cdot 0,046} \times \\ \times \frac{10^{-6}}{1 - 0,32} \cdot \left[ \frac{0,394}{7} \cdot (1,1 + 0,56) + 0,008 \right] = 0,107.$$

По отношению  $\frac{t_1}{\tau} = \frac{25,41}{238} = 0,107$  при  $N_c = 7$  из рис. 28 определяем  $k_\delta = 0,32$ .

$$\lambda_\delta = \left( 0,785 - \frac{b_{ш2}}{2 \cdot d_{п2}} \right) + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} = \left( 0,785 - \frac{4}{2 \cdot (10,5 + 0,1)} \right) + \frac{2}{4} = 1,1.$$

Пазы на роторе выбирают круглые, полузакрытые (см. рис. 13). Диаметр паза  $d_{п2} = d_c + (0,1 \div 0,2)$  мм. Ширина шлица  $b_{ш2} = 3 \div 4$  мм, высота шлица  $h_{ш2} = 2 \div 3$  мм.

$$\lambda_{ду} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta_{ср} \cdot k_\delta} = \frac{25,41}{12 \cdot 2,86 \cdot 1,32} = 0,56,$$

$$\lambda_{rd} = \frac{0,19 \cdot \tau \cdot C_d}{N_c} = \frac{0,19 \cdot 238 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}}{7} = 0,8 \cdot 10^{-2},$$

$C_d$  – коэффициент приведения из рис. 27,  $C_d = 1,3$ .

9.4. Индуктивное сопротивление рассеяния демпферной обмотки по поперечной оси (146):

$$X_{kq*} = 7,9 \cdot \frac{F_{ан}}{2 \cdot \Phi_H} \cdot \frac{10^{-6}}{1 + k_\delta} \cdot \left[ \frac{l_p}{N_c} \cdot (\lambda_\delta + \lambda_{ду}) + \lambda_{rq} \right] = 7,9 \cdot \frac{8388}{2 \cdot 0,046} \times \\ \times \frac{10^{-6}}{1,32} \cdot \left[ \frac{0,394}{7} \cdot (1,1 + 0,56) + 0,0126 \right] = 0,058;$$

$$\lambda_{rq} = \frac{0,19 \cdot \tau \cdot C_q}{N_c} = \frac{0,19 \cdot 238 \cdot 1,95 \cdot 10^{-3}}{7} = 0,0126,$$

$C_q$  – коэффициент приведения из рис. 27,  $C_q = 1,95$ .

## Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью более 100 кВт

Позиция на рис. 24	Материал		Число слоев	Общая толщина, мм	Примечание
	Наименование	Толщина, мм			
1	Медь полосовая	–	–	–	–
2	Бумага асбестовая электроизоляционная	0,2	2	0,4	Для класса нагревостойкости <i>B</i> лакировка глифталебакелитовым лаком
3	Миканит формовочный (или микафолий, или стекломикафолий)	0,5 (0,2)	3 (8)	1,5 (1,6)	Для тропического исполнения применять только стекломикафолий
4, 6	Миканит прокладочный	0,5	1	0,5	Промежутки между шайбами и сердечником заполняются электроизоляционной замаской
5	Стеклотекстолит	5	1	5	–
7	То же	8	1	8	–

9.5. Активное сопротивление обмотки возбуждения, приведенная к обмотке статора, при рабочей температуре 75 °С, соответствующей принятому классу нагревостойкости изоляции В (о. е.) (148):

$$r_{B*} = \frac{0,44 \cdot F_{ан} \cdot k_{ад} \cdot l_{всп}}{2 \cdot 10^8 \cdot \Phi_{\delta} \cdot f \cdot \omega_B \cdot S_B} =$$

$$= \frac{0,44 \cdot 8388 \cdot 1,121 \cdot 0,85^2}{2 \cdot 10^8 \cdot 0,046 \cdot 50 \cdot 33 \cdot 46,02 \cdot 10^{-6}} = 0,00427,$$

$k_{ад}$  – из рис. 19.

9.6. Активное сопротивление демпферной обмотки при равномерном распределении стержней по продольной оси при  $\theta = 75$  °С (149):

$$r_{kd*} = \frac{2,16}{10^8} \cdot \frac{F_{ан}}{2 \cdot f \cdot \Phi_{\delta}} \cdot \frac{1}{1 - k_{\delta}} \cdot \left( \frac{c_c \cdot l_c}{q_c \cdot N_c} + \frac{c_{кз} \cdot \tau \cdot C_d}{q_{кз} \cdot N_c} \right) = \frac{2,16}{10^8} \times$$

$$\times \frac{8388}{2 \cdot 50 \cdot 0,046} \cdot \frac{1}{1 - 0,32} \cdot \left( \frac{1 \cdot 0,465}{86,5 \cdot 10^{-6} \cdot 7} + \frac{1 \cdot 0,238 \cdot 1,3}{302,75 \cdot 10^{-6} \cdot 7} \right) = 0,053.$$

9.7. Активное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси при  $\theta = 75$  °С (150):

$$r_{kq*} = \frac{2,16}{10^8} \cdot \frac{F_{ан}}{2 \cdot f \cdot \Phi_{\delta}} \cdot \frac{1}{1 + k_{\delta}} \cdot \left( \frac{c_c \cdot l_c}{S_c \cdot N_c} + \frac{c_{кз} \cdot \tau \cdot C_q}{S_{кз} \cdot N_c} \right) = \frac{2,16}{10^8} \cdot \frac{8388}{2 \cdot 50 \cdot 0,046} \times$$

$$\times \frac{1}{1 + 0,32} \cdot \left( \frac{1 \cdot 0,465}{86,5 \cdot 10^{-6} \cdot 7} + \frac{1 \cdot 0,238 \cdot 1,95}{302,75 \cdot 10^{-6} \cdot 7} \right) = 0,0292,$$

где  $c_c = c_{кз}$ .

9.8. Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси (151):

$$X'_{d*} = X_{1*} + \frac{X_{ад*} \cdot X_{в\sigma*}}{X_{ад*} + X_{в\sigma*}} = 0,137 + \frac{1,25 \cdot 0,86}{1,25 + 0,86} = 0,646.$$

9.9. Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси (152):

$$X'_{q*} = X_{q*} = 0,817.$$

9.10. Сверхпроводное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси (153):

$$X''_{d*} = X_{1*} + \frac{X_{kd*} \cdot (X'_{d*} - X_{1*})}{X_{kd*} + X'_{d*} - X_{1*}} = 0,137 + \frac{0,107 \cdot (0,646 - 0,137)}{0,107 + 0,646 - 0,137} = 0,225.$$

По поперечной оси (154):

$$X''_{q*} = X_{1*} + \frac{X_{aq*} \cdot X_{kq*}}{X_{aq*} + X_{kq*}} = 0,137 + \frac{0,68 \cdot 0,058}{0,68 + 0,058} = 0,19.$$

9.11. Индуктивное сопротивление обмотки статора для токов обратной последовательности при работе машины на малое внешнее сопротивление (к. з.) (155):

$$X_{2*} = \sqrt{X''_{d*} \cdot X''_{q*}} = \sqrt{0,225 \cdot 0,19} = 0,206.$$

9.12. Постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутых обмотках статора и ротора (156):

$$T_{d0} = \frac{X_{в*}}{\omega \cdot r_{в*}} = \frac{1,54}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,00427} = 1,15 \text{ с.}$$

9.13. Постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутой обмотке статора (157):

$$T'_d = T_{d0} \cdot \frac{X'_{d*}}{X_{d*}} = 1,15 \cdot \frac{0,646}{1,387} = 0,53 \text{ с.}$$

9.14. Постоянная времени демпферной обмотки при разомкнутых обмотках статора и возбуждения:

– по продольной оси (158)

$$T_{kd0} = \frac{X_{ad*} + X_{kd*}}{\omega \cdot r_{kd*}} = \frac{1,25 + 0,107}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,053} = 0,08 \text{ с,}$$

– по поперечной оси (159)

$$T_{kq0} = \frac{X_{aq*} + X_{kq*}}{\omega \cdot r_{kq*}} = \frac{0,68 + 0,058}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0292} = 0,08 \text{ с.}$$

9.15. Постоянная времени пусковой обмотки по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке возбуждения и разомкнутой обмотке статора (160):

$$T''_{kdB} = \frac{X_{kd*} \cdot X_{B\delta*} + X_{ad*} \cdot X_{kd*} + X_{ad*} \cdot X_{B\delta*}}{\omega \cdot r_{kd*} \cdot (X_{ad*} + X_{B\delta*})} =$$

$$= \frac{0,107 \cdot 0,29 + 1,25 \cdot 0,107 + 1,25 \cdot 0,29}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,053 \cdot (1,25 + 0,29)} = 0,021 \text{ с.}$$

9.16. Постоянная времени пусковой обмотки по продольной оси полюсов при замкнутой накоротко обмотке статора и обмотке возбуждения (161):

$$T''_{kd} = T''_{kdB} \cdot \frac{X''_{d*}}{X'_{d*}} = 0,027 \cdot \frac{0,225}{0,646} = 0,007 \text{ с.}$$

9.17. Постоянная времени пусковой обмотки по поперечной оси полюсов при замкнутой накоротко обмотке статора (162):

$$T''_{kq} = T_{kq0} \cdot \frac{X''_{q*}}{X'_{q*}} = 0,08 \cdot \frac{0,19}{0,817} = 0,019 \text{ с.}$$

9.18. Постоянная времени обмотки статора при короткозамкнутых обмотках ротора (163):

$$T_a = \frac{X_{2*}}{\omega \cdot r_{1*}} = \frac{0,2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0179} = 0,036 \text{ с.}$$

Вычисленные параметры обмоток и постоянные времени находятся в пределах изменения параметров и постоянных времени синхронных машин общего назначения (табл. 10 и 11).

## 10. Масса активных материалов

10.1. Масса зубцов статора, кг (164):

$$m_{z1} = 7,8 \cdot l_i \cdot k_{c1} \cdot h_{п1} \cdot b_{z1/2} \cdot z_1 \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 334 \cdot 0,95 \cdot 71 \cdot 21,96 \times$$

$$\times 90 \cdot 10^{-6} = 347 \text{ кг,}$$

$$b_{z1/2} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{п1})}{z_1} - b_{п1} = \frac{3,14 \cdot (908 + 71)}{90} - 12,2 = 21,96.$$

10.2. Масса ярма магнитопровода статора, кг (165):

$$m_{c1} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot l_i \cdot k_c \cdot \pi \cdot (D_{1н} - h_c) \cdot h_c = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot 334 \cdot 0,95 \cdot 3,14 \times$$

$$\times (1180 - 65) \cdot 65 = 563 \text{ кг,}$$

$$h_c = \frac{(D_{1H} - D_1)}{2} - h_{п1} = \frac{(1180 - 908)}{2} - 71 = 65.$$

10.3. Масса стали полюсов, кг (166):

$$m_m = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot l'_m \cdot k_{cp} \cdot 2 \cdot p \cdot (h_m \cdot b_m + 0,8 \cdot h_p \cdot b_p) = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot 410 \times \\ \times 0,95 \cdot 12 \cdot (148 \cdot 97 + 0,8 \cdot 30 \cdot 169) = 671 \text{ кг.}$$

10.4. Масса стали обода ротора, кг (167):

$$m_{об} = 7800 \cdot l_{об} \cdot \pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{mp} - h_{об}) \cdot h_{об} = 7,8 \cdot 10^{-6} \cdot 454 \cdot 3,14 \times \\ \times (908 - 2 \cdot 2,45 - 2 \cdot 178 - 48) \cdot 48 = 266 \text{ кг,}$$

$$h_{mp} = h_m + h_p = 148 + 30 = 178.$$

10.5. Масса меди обмотки статора, кг (168):

$$m_{м1} = \frac{8,9 \cdot 10^{-6} \cdot S_{1\text{эф}} \cdot u_{п1} \cdot z_1 \cdot l_{1cp}}{2} = \frac{8,9 \cdot 10,51 \cdot 24 \cdot 90 \cdot 1596}{2} = 161 \text{ кг.}$$

10.6. Масса меди обмотки возбуждения, кг (169):

$$m_{мв} = 8900 \cdot S_{в} \cdot l_{вcp} \cdot 2 \cdot p \cdot \omega_{в} = 8,9 \cdot 10^{-6} \cdot 46,02 \cdot 1121 \cdot 12 \cdot 33 = 182 \text{ кг.}$$

10.7. Масса меди стержней пусковой обмотки, кг (170):

$$m_{мс} = 8900 \cdot S_c \cdot 2 \cdot p \cdot N_c \cdot l_c = 8,9 \cdot 10^{-6} \cdot 86,5 \cdot 12 \cdot 7 \cdot 465 = 30 \text{ кг.}$$

10.8. Масса меди короткозамыкающих колец, кг (171):

$$m_{мкз} = 8900 \cdot S_{кз} \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{ш2} - 2 \cdot d_{п2}) \cdot 2 \cdot \pi = 8,9 \cdot 10^{-6} \cdot 314,1 \times \\ \times (908 - 2 \cdot 2,45 - 2 \cdot 2 - 10,7) \cdot 6,28 = 15,6 \text{ кг.}$$

10.9. Полная масса активной стали по (172):

$$m_{ст} = m_{z1} + m_{c1} + m_m + m_{об} = 347 + 563 + 671 + 266 = 1847 \text{ кг.}$$

10.10. Полная масса меди по (173):

$$m_{м} = m_{м1} + m_{мв} + m_{мс} + m_{мкз} = 161 + 182 + 30 + 15,6 = 388,6 \text{ кг.}$$

## 11. Потери и КПД

11.1. Электрические потери в обмотке статора (174):

$$P_{э1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 56,9^2 \cdot 1,09 = 10587 \text{ Вт.}$$

11.2. Потери на возбуждение, Вт (175):

$$P_B = I_{BH}^2 \cdot r_{B75} + \Delta U_{щ} \cdot I_B = 230^2 \cdot 0,2094 + 2 \cdot 230 = 11537 \text{ Вт},$$

$$r_{B75} = r_{B130} \cdot \frac{39}{46} = 0,247 \cdot \frac{39}{46} = 0,2094.$$

11.3. Магнитные потери в ярме магнитопровода статора, Вт (176):

$$P_{cl} = k_{da} \cdot p_{c1/50} \cdot B_{cl}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{cl} = 1,3 \cdot 2,5 \cdot 1,1^2 \cdot 1 \cdot 563 = 2214 \text{ Вт}.$$

11.4. Магнитные потери в зубцах магнитопровода статора, Вт (177):

$$P_{z1} = k_{dz} \cdot p_{z1/50} \cdot B_{z1/3}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{z1} = 1,7 \cdot 2,5 \cdot 1,32^2 \cdot 1 \cdot 347 = 2570 \text{ Вт}.$$

11.5. Механические потери по (178):

$$P_{мех} = 3,68 \cdot p \cdot \left(\frac{\vartheta_2}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{l_1} = 3,68 \cdot 6 \cdot \left(\frac{23,6}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{0,394} \cdot 10^3 = 2846 \text{ Вт},$$

$$\vartheta_2 = \frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta_{cp}) \cdot n_1}{60} = \frac{3,14 \cdot (908 - 2 \cdot 2,86) \cdot 500 \cdot 10^{-3}}{60} = 23,6 \text{ м/с}.$$

11.6. Добавочные потери холостого хода (поверхностные потери в полюсных наконечниках) определяются по (179):

$$P_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot p \cdot b_p \cdot l_1 \cdot (z_1 \cdot n_1 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot [B_{\delta_{ном}} \cdot (k_{\delta 1} - 1) \cdot t_1]^2 = 4,6 \cdot 6 \cdot 169 \times \\ \times 394 \cdot (90 \cdot 500 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot [0,88 \cdot (1,32 - 1) \cdot 31,7]^2 = 1398 \text{ Вт}.$$

11.7. Добавочные потери при нагрузке:

$$P_{доб} = 0,005 \cdot P'_{1H} = 0,005 \cdot 534 = 2670 \text{ Вт},$$

где  $P'_{1H}$  – предварительное значение подводимой мощности в номинальном режиме.

$$P'_{1H} = \frac{P_{ном}}{\eta'_{ном}} = \frac{500}{0,937} = 534 \text{ кВт}.$$

$\eta'_{ном}$  – по таблице 5.



11.8. Общие потери в номинальном режиме работы двигателя (180):

$$\begin{aligned} \sum P &= (P_{\text{эл}} + P_{\text{в}} + P_{\text{с1}} + P_{\text{з1}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{п}} + P_{\text{доб}}) \cdot 10^{-3} = \\ &= (10587 + 11537 + 2214 + 2570 + 2846 + 1398 + 2670) \cdot 10^{-3} = 33,82 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

11.9. КПД двигателя при номинальной нагрузке (181):

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_{\text{ном}}} = 1 - \frac{33,82}{533,82} = 0,94,$$

где  $P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} + \sum P = 500 + 33,82 = 533,82 \text{ кВт.}$

## 12. Тепловой расчет

12.1. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой охлаждающего воздуха внутри машины, °С (182):

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{\text{пов1}} &= \frac{P_{\text{эл}} \cdot (2 \cdot l_1 / l_{\text{ср1}}) + P_{\text{м1}}}{\pi \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \alpha_1 \cdot (1 + 0,1 \cdot \vartheta_2)} = \\ &= \frac{10587 \cdot (2 \cdot 394 / 1596) + 4784}{3,14 \cdot 908 \cdot 394 \cdot 8 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 0,1 \cdot 23,6)} = 33 \text{ °С,} \end{aligned}$$

где  $P_{\text{м1}} = P_{\text{с1}} + P_{\text{з1}} = 2214 + 2570 = 4784$ ;

$$\alpha_1 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/мм}^2 \cdot \text{°С, при } l_1 / \tau \leq 2.$$

12.2. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха, °С (182):

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{\text{л1}} &= \frac{A_1 \cdot \Delta_1 \cdot t_1 \cdot \rho_{\text{сu75}} \cdot 10^6}{13,3 \cdot (1 + 0,07 \cdot \vartheta_2) \cdot \Pi_{\text{л1}}} = \frac{431 \cdot 10^2 \cdot 5,41 \cdot 31,7 \cdot 21,3 \cdot 10^{-9} \cdot 10^6}{13,3 \cdot (1 + 0,07 \cdot 23,6) \cdot 164} = \\ &= 29,5 \text{ °С,} \end{aligned}$$

где  $\Pi_{\text{л1}} = 2 \cdot (h_{\text{п1}} + b_{\text{п1}}) = 2 \cdot (71 + 12,2) = 164$ .

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки  $\Delta\theta_{\text{из}}$  определяют по (31) и составляет  $\Delta\theta_{\text{из}} = 10,5 \text{ °С.}$

12.3. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды (184):

$$\theta_1 = \frac{2 \cdot [(\Delta\theta_{\text{изл}} + \Delta\theta_{\text{повл}}) \cdot l_1 + (\Delta\theta_{\text{изл}} + \Delta\theta_{\text{л1}}) \cdot l_{1л}]}{l_{\text{ср}}} =$$

$$= \frac{2 \cdot [(10,5 + 33) \cdot 394 + (10,5 + 29,5) \cdot 334]}{1596} = 38,2 \text{ } ^\circ\text{C},$$

что не больше допустимого превышения температуры обмотки статора при классе нагревостойкости изоляции  $B$  ( $80^\circ$ ) по ГОСТ 183-74.

### 13. Характеристики синхронного двигателя

#### 13.1. Угловая характеристика $M_* = f(\theta)$ (185)

$$M_* = \frac{E'_{10*}}{X_{d*}} \cdot \sin \theta + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{X_{q*}} - \frac{1}{X_{d*}} \right) \cdot \sin 2\theta = \frac{3}{1,854} \cdot \sin \theta + \frac{1}{2} \times$$

$$\times \left( \frac{1}{1,074} - \frac{1}{1,854} \right) \cdot \sin 2\theta = 1,62 \cdot \sin \theta + 0,2 \cdot \sin 2\theta.$$

Построенная по этому уравнению характеристика дана на рис. 36.

#### 13.2. Статическая перегружаемость по (187)

$$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{н}}} = \frac{E'_{10*}}{X_{d*} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}} \cdot k_{\text{pc}} = \frac{2,6}{1,854 \cdot 0,9} \cdot 1,03 = 1,85.$$

При МДС обмотки возбуждения  $F_{\text{вн}*} = 2,6$  по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода находим  $E'_{10*} = 3$  (см. рис. 37).

По рис. 31 при  $\frac{X_{d*} - X_{q*}}{E'_{10*} \cdot X_{q*}} = \frac{1,854 - 1,074}{2,6 \cdot 1,074} = 0,28$  находим  $k_{\text{pc}} = 1,03$ .

$1,85 > 1,65$  – в пределах нормы.

13.3. U-образные характеристики  $I_{1*} = f(I_{\text{в}*})$  построены по векторным диаграммам Blondеля для трех значений мощности:  $P_{1*} = 0,9, 0,5$  и  $0,2$ . За базовое значение мощности принята мощность  $S_{\text{н}} = m \cdot U_{\text{н.ф}} \cdot I_{\text{н.ф}} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 3464 \cdot 56,9 \cdot 10^{-3} = 591 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ , за базовое значение тока принят номинальный ток  $I_{\text{н.ф}} = 56,9 \text{ А}$ .

При  $P_{1\text{н}}$  векторные диаграммы для трех значений тока  $I_{(1)*} = 0,95$ ;  $I_{(2)*} = 0,9$ ;  $I_{(3)*} = 0,93$  представлены на рис. 38. Расчетные значения, необходимые для построения векторных диаграмм и определения тока возбуждения при  $P = P_{1\text{н}}$ , сведены в таблицу 24 (в отно-

сительных единицах). Ток возбуждения  $I_{в*}$ , соответствующий номинальному току якоря был определен раньше по рис. 35. Для других значений мощности  $P_{1*} = 0,9$ ,  $P_{1*} = 0,5$ ,  $P_{1*} = 0,2$  U-образные характеристики строятся аналогично. Векторные диаграммы и характеристики приведены на рис. 39, 40а, 40б, 40в. Расчетные значения, необходимые для построения указанных диаграмм и определения величин тока возбуждения, даны в таблице 23. При построении векторных диаграмм (рис. 40) падениями напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния и активном сопротивлении статора пренебрегают [6], [7].

#### 13.4. Рабочие характеристики двигателей.

Характеристики, выражающие зависимость  $P_{1*}$ ,  $I_{1*}$ ,  $\cos \varphi$ ,  $n$ ,  $M^*$  от полезной мощности  $P_2$  при  $U_{1*} = 1 = \text{const}$  и  $I_{вн.*} = \text{const}$ , можно получить пользуясь U-образными характеристиками, построенными для ряда значений мощности  $P_{1*}$ , из которых при  $I_{в}$  находят значения тока якоря (рис. 39):

- для  $P_{1*} = 0,9$  (532 кВт) ток  $I_{1*} = 0,98$  (55,8 А),
- для  $P_{1*} = 0,5$  (296 кВт) ток  $I_{1*} = 0,64$  (36,4 А),
- для  $P_{1*} = 0,2$  (118 кВт) ток  $I_{1*} = 0,56$  (31,9 А).

Расчет рабочих характеристик приведен в таблице 25. При расчете общих потерь  $\sum P$  пересчитываются электрические потери в обмотке статора и добавочные потери (пропорциональны  $I^2$ ). Остальные потери остаются неизменными. Рабочие характеристики показаны на рис. 41.

#### 13.5. Пусковые характеристики.

Проведенный расчет  $M_{п*}$  при  $s = 1$  показал, что  $M_{п*} = 0,7$ , что является низким. В целях повышения пускового момента заменяем четыре медных стержня из семи на латунные того же размера. Активное сопротивление пусковой обмотки по продольной оси по (149):

$$r_{kd*} = \frac{2,16 \cdot F_{ан}}{10^8 \cdot 2 \cdot f \cdot \Phi_{\delta}} \cdot \frac{1}{1 - k_{\delta}} \left[ \frac{c'_c \cdot c''_c \cdot l_c}{(c''_c \cdot N'_c + c'_c \cdot N''_c) S_c} + \frac{c_{кз} \cdot \tau \cdot C_d}{S_{кз} \cdot N_c} \right] =$$

$$= \frac{2,16 \cdot 8388}{10^8 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 0,046} \cdot \frac{1}{1 - 0,32} \left[ \frac{1 \cdot 4 \cdot 0,465}{(4 \cdot 3 + 4 \cdot 1) 86,5 \cdot 10^{-6}} + \frac{1 \cdot 0,238 \cdot 1,3}{302,75 \cdot 10^{-6} \cdot 7} \right] =$$

$$= 0,0863.$$

Активное сопротивление пусковой обмотки по поперечной оси по (150):

$$r_{kq*} = \frac{2,16 \cdot F_{ан}}{10^8 \cdot 2 \cdot f \cdot \Phi_{\delta}} \cdot \frac{1}{1 + k_{\delta}} \cdot \left[ \frac{c'_c \cdot c''_c \cdot l_c}{(c''_c \cdot N'_c + c'_c \cdot N''_c) \cdot S_c} + \frac{c_{кз} \cdot \tau \cdot C_q}{S_{кз} \cdot N_c} \right] =$$

$$= \frac{2,16 \cdot 8388}{10^8 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 0,046} \cdot \frac{1}{1 + 0,32} \cdot \left[ \frac{1 \cdot 4 \cdot 0,465}{(4 \cdot 3 + 4 \cdot 1) \cdot 86,5 \cdot 10^{-6}} + \frac{1 \cdot 0,238 \cdot 1,95}{302,75 \cdot 10^{-6} \cdot 7} \right] =$$

$$= 0,0466.$$

Расчет пусковых характеристик сведен в таблице 26. По данным этой таблицы на рис. 42 построены характеристики.

Начальный пусковой момент  $M_{п*} = 1,02$ .

Начальный пусковой ток  $I_{п*} = 4,82$ .

Расчетные значения для построения векторных диаграмм для трех значений мощности

Мощность	$I^*$	$E_{\delta^*}$	$\frac{F_{\delta zc^*}}{F_{\delta^*}}$	$\tilde{k}$	$\tilde{\chi}_d$	$\tilde{\chi}_q$	$\tilde{\chi}_q \cdot k_{aq^*} \times F_{a^*}$	$\frac{E_{aq^*}}{\cos \psi}$	$E_{2d^*}$	$F_{2d^*}$	$\Psi$	$F_{ad}''$	$F_{2d^*} + F_{ad}''$	$\Phi_{\sigma^*}$	$\Phi_{2d^*} + \Phi_{\sigma^*}$	$F_{\rho^*}$	$F_{B^*} = I_{B^*}$
$P_1 = 0,9 \cdot P_{1H}$	0,98	1	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,43	0,56	0,90	0,71	45	0,68	1,39	0,27	1,17	0,24	1,63
	0,9	1	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,39	0,5	0,86	0,69	27	0,41	1,1	0,23	1,09	0,2	1,3
	1,015	1	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,42	0,55	0,82	0,65	15	0,24	0,89	0,2	1,02	0,18	1,07
$P_1 = 0,5 \cdot P_{1H}$	0,98	1	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,24	0,3	0,96	0,78	36	0,31	1,09	0,23	1,19	0,24	1,33
	0,9	1	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,22	0,28	0,95	0,77	15	0,14	0,91	0,2	1,15	0,22	1,13
	0,96	1	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,23	0,29	0,94	0,76	1	0,06	0,82	0,17	1,11	0,2	1,02
$P_1 = 0,2 \cdot P_{1H}$	0,98	1	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,096	0,15	0,99	0,8	30	0,11	0,91	0,2	1,19	0,23	1,14
	0,9	1	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,088	0,13	0,99	0,8	8	0,033	0,83	0,19	1,18	0,23	1,05
	0,96	1	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,092	0,14	0,98	0,78	9	0,039	0,82	0,18	1,16	0,22	1,04

Таблица 24

## Расчетные значения, необходимые для построения векторных диаграмм

$I_*$	$E_{\delta^*}$	$\frac{F_{\delta zc^*}}{F_{\delta^*}}$	$\tilde{k}$	$\tilde{\chi}_d$	$\tilde{\chi}_q$	$\tilde{\chi}_q \cdot k_{aq^*} \times$ $\times F_{a^*}$	$\frac{E_{aq^*}}{\cos \psi}$	$E_{2d^*}$	$F_{2d^*}$	$\psi$	$F_{ad^*}''$	$\Phi_{2d^*} + \Phi_{\sigma}$	$F_{p^*}'$	$F_{B^*} = I_{B^*}$
0,98	1,06	1,021	$5 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,97	0,47	0,61	0,98	0,8	50	0,82	1,3	0,35	1,97
0,9	1,01	1,019	$4 \cdot 10^{-4}$	0,98	0,95	0,43	0,53	0,9	0,75	32	0,54	1,17	0,3	1,59
0,96	0,97	1,015	$3 \cdot 10^{-4}$	0,97	0,92	0,44	0,59	0,79	0,65	22	0,35	1,00	0,17	1,17

Таблица 25

## Данные рабочих характеристик

$P_{1^*}$	$P_1$ , кВт	$I_{1^*}$	$I_1$ , А	$\cos \varphi = \frac{P_1}{m \cdot U_n \cdot I_1}$	$P_{\text{эл}}$ , кВт	$P_{\text{доб}}$ , кВт	$\Sigma P$ , кВт	$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	$M = 9550 \times$ $\times \frac{P_2}{n_n}$ , Н·м
0,9	532	0,97	55,8	0,92	10,18	2,66	33,40	0,937	498,6	9523
0,5	296	0,64	36,4	0,78	4,33	1,48	26,37	0,91	269,6	5149
0,2	118	0,56	31,9	0,36	3,1	0,59	24,25	0,80	93,75	1791

## Расчетные значения для построения пусковых характеристик

Параметр	Скольжения				
	$S = 1$	$S = 0,5$	$S = 0,2$	$S = 0,1$	$S = 0,05$
$\underline{Y}_{bs} = \frac{1}{r'_b/s + j \cdot X_{b\sigma}} = \frac{r'_b/s - j \cdot X_{b\sigma}}{(r'_b/s)^2 + (X_{b\sigma})^2}$	$0,497 - j \cdot 3,376$	$0,934 - j \cdot 3,173$	$1,646 - j \cdot 2,236$	$1,603 - j \cdot 1,088$	$1,05 - j \cdot 0,357$
$\underline{Y}_{kds} = \frac{1}{r'_{kd}/s + j \cdot X_{kd}} = \frac{r'_{kd}/s - j \cdot X_{kd}}{(r'_{kd}/s)^2 + (X_{kd})^2}$	$4,568 - j \cdot 5,664$	$4,11 - j \cdot 2,55$	$2,19 - j \cdot 0,55$	$1,15 - j \cdot 0,14$	$0,58 - j \cdot 0,36$
$\underline{Y}'_{ds} = \frac{1}{j \cdot X_{ad}} + \underline{Y}_{bs} + \underline{Y}_{kds}$	$5,065 - j \cdot 9,84$	$5,04 - j \cdot 6,52$	$3,84 - j \cdot 3,59$	$2,75 - j \cdot 2,03$	$1,63 - j \cdot 1,52$
$\underline{Z}'_{ds} = 1/\underline{Y}'_{ds}$	$0,041 + j \cdot 0,08$	$0,074 + j \cdot 0,096$	$0,139 + j \cdot 0,13$	$0,24 + j \cdot 0,174$	$0,33 + j \cdot 0,31$
$\underline{Z}_{ds} = j \cdot X_1 + \underline{Z}'_{ds}$	$0,041 + j \cdot 0,217$	$0,074 + j \cdot 0,233$	$0,139 + j \cdot 0,237$	$0,24 + j \cdot 0,281$	$0,33 + j \cdot 0,417$
$1/\underline{Z}_{ds}$	$0,842 - j \cdot 4,46$	$1,24 - j \cdot 3,9$	$1,84 - j \cdot 3,14$	$1,76 - j \cdot 2,06$	$1,17 - j \cdot 1,47$
$\underline{Y}_{kqs} = \frac{1}{r'_{kq}/s + j \cdot X_{kq}} = \frac{r'_{kq}/s - j \cdot X_{kq}}{(r'_{kq}/s)^2 + (X_{kq})^2}$	$8,47 - j \cdot 10,55$	$7,73 - j \cdot 4,8$	$4,04 - j \cdot 1,0$	$2,1 - j \cdot 0,26$	$1,07 - j \cdot 0,067$
$\underline{Y}'_{ds} = \frac{1}{j \cdot X_{aq}} + \underline{Y}_{kqs}$	$8,47 - j \cdot 12,02$	$7,73 - j \cdot 6,27$	$4,04 - j \cdot 2,47$	$2,1 - j \cdot 1,73$	$1,07 - j \cdot 1,54$
$\underline{Z}'_{qs} = 1/\underline{Y}'_{qs}$	$0,039 - j \cdot 0,056$	$0,078 - j \cdot 0,063$	$0,18 + j \cdot 0,077$	$0,28 + j \cdot 0,234$	$0,3 + j \cdot 0,44$
$\underline{Z}_{qs} = j \cdot X_1 + \underline{Z}'_{qs}$	$0,039 + j \cdot 0,196$	$0,078 + j \cdot 0,2$	$0,18 + j \cdot 0,214$	$0,28 + j \cdot 0,371$	$0,3 + j \cdot 0,577$
$1/\underline{Z}_{qs}$	$1 - j \cdot 4,98$	$1,69 - j \cdot 4,34$	$2,3 - j \cdot 2,74$	$1,3 - j \cdot 1,72$	$0,71 - j \cdot 1,36$

Окончание табл. 26

Параметр	Скольжения				
	$S = 1$	$S = 0,5$	$S = 0,2$	$S = 0,1$	$S = 0,05$
$I' = (1/\underline{Z}_{qs} + 1/\underline{Z}_{ds})/2 = I'_a - j \cdot I'_p$	$0,92 - j \cdot 4,72$	$1,46 - j \cdot 4,12$	$2,07 - j \cdot 2,94$	$1,57 - j \cdot 1,89$	$0,94 - j \cdot 1,41$
$I'' = (1/\underline{Z}_{qs} + 1/\underline{Z}_{ds})/2 = I''_a - j \cdot I''_p$	$0,079 - j \cdot 0,26$	$0,23 - j \cdot 0,22$	$0,23 + j \cdot 0,2$	$-0,23 + j \cdot 0,17$	$-0,23 + j \cdot 0,06$
$I'$	4,81	4,37	3,59	2,46	1,69
$I''$	0,27	0,32	0,30	0,28	0,23
$I$	4,82	4,38	3,60	2,48	1,71
$M = I''_{II} / \cos \varphi_H$	1,02	1,62	2,3	1,74	1,04

Примечание.  $X_{BG*} = 0,29$ ;  $r'_{B*} = 10$ ;  $r_B = 0,0427$ ;  $X_{kd*} = 0,107$ ;  $X_{kq*} = 0,058$ ;  $r_{kd*} = 0,053$ ;  $r_{kq*} = 0,0466$ ;  $X_{1*} = 0,137$ ;  
 $X_{ad*} = 1,25$ ;  $X_{aq*} = 0,68$ .



## ЛИТЕРАТУРА

1. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – Москва : Высш. шк., 2000. – 607 с.
2. Проектирование электрических машин / под ред. И. П. Копылова. – Москва : Энергия, 1980. – 495 с.
3. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – Москва : Высш. шк., 2001. – 430 с.
4. Кацман, М. М. Расчет и конструирование электрических машин / М. М. Кацман. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 359 с.
5. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Ленинград : Энергия, 1978. – 832 с.
6. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – Москва : Изд-во МЭИ, 2004. – 532 с.
7. Домбровский, В. В. Основы проектирования электрических машин переменного тока / В. В. Домбровский, Г. М. Хуторецкий. – Ленинград : Энергия, 1976. – 503 с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

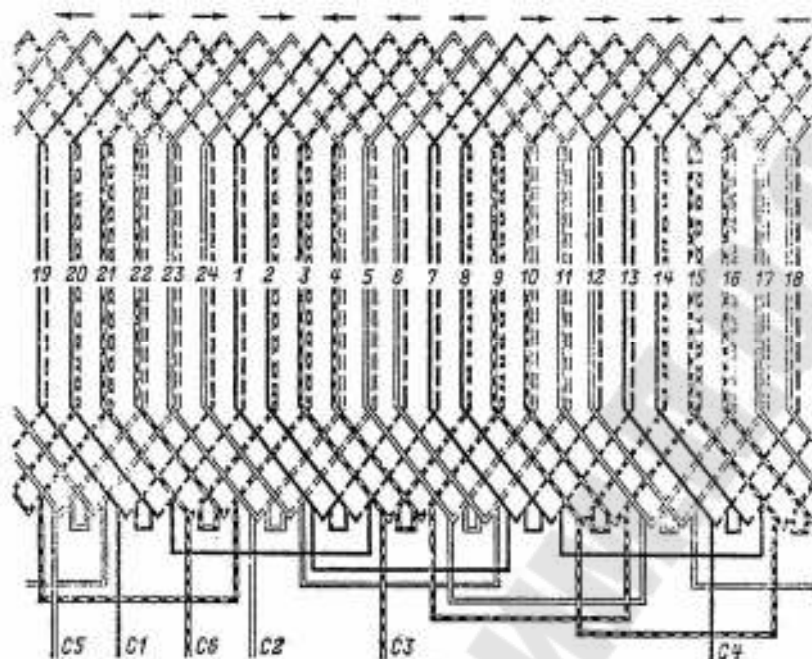


Рис. П.1.1. Схема двухслойной обмотки с укороченным шагом  
 $z = 24, 2p = 4$

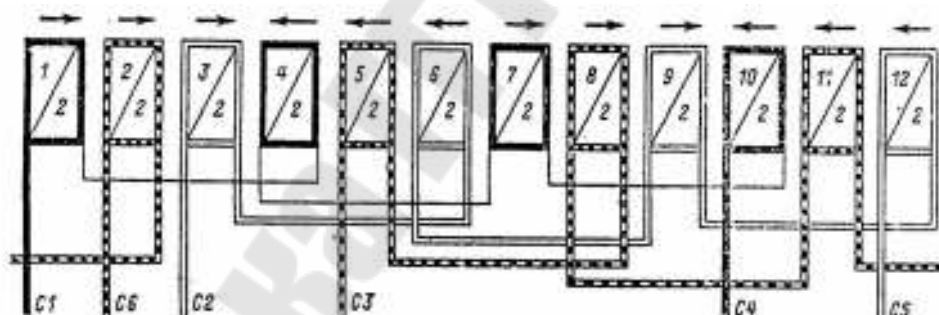


Рис. П.1.2. Условная схема обмотки  $z = 24, 2p = 4, q = 2, y = 5$

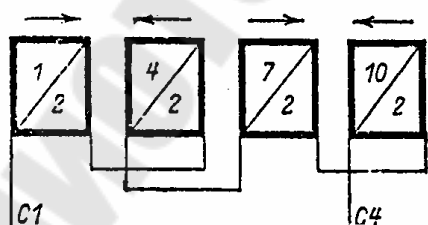
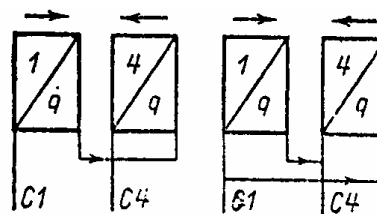


Рис. П.1.3. Условная схема первой фазы А обмотки. Вторая и третья фазы соединяются аналогично



а) б)

Рис. П.1.4. Схема соединения фазы обмотки с  $2p = 2$  при различном числе параллельных ветвей:  
а – при  $a = 1$ ; б – при  $a = 2$

## Приложение 2

Номинальный диаметр проволоки, мм	Номинальный размер проволоки по второй стороне а, мм																	
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10
	Расчетная площадь проволоки, мм <sup>2</sup>																	
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,865	2,025	2,145	2,265	2,425	2,545	—	—	—	—	—	—	—
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	2,565	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—
2,35	1,751	—	1,950	—	2,145	—	2,439	—	2,735	—	3,089	—	3,361	—	—	—	—	—
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,735	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—
2,65	1,963	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—
2,80	2,103	2,225	2,348	2,468	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—
3,00	2,283	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,965	—	4,565	—	5,038	—	5,538	—
3,15	2,383	2,522	2,651	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	2,863	—	3,291	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—
4,00	3,003	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,457	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,283	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,387	—	8,137	—
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	3,663	—	4,191	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,30	4,103	—	4,506	—	5,085	—	5,721	—	6,410	—	7,305	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,067	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6,00	4,683	—	5,225	—	5,785	—	6,505	—	7,365	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,650	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,90
6,70	—	—	5,856	—	6,485	—	7,239	—	8,160	—	9,165	—	10,510	—	11,70	—	13,04	—
7,10	—	—	6,246	6,651	6,885	7,311	7,737	8,163	8,650	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,50	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,160	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—
8,00	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,69	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60
8,50	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—
9,00	—	—	—	—	—	—	9,865	10,410	11,04	11,67	12,39	13,39	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,50	—	—	—	—	—	—	—	—	11,65	—	13,09	—	14,89	—	16,74	—	18,64	—
10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,47	16,59	17,71	18,68	19,60	20,92	22,04	23,38
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,67	—	20,88	—	23,34	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

Рис. П.2.1. Размеры и площади поперечного сечения  
прямоугольной проволоки (1-й фрагмент; продолжение  
и окончание см. на с. 124 и 125)

Номинальный диаметр проволоки по меньшей стороне d, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне d, мм																
	1,24	1,36	1,50	1,65	1,80	1,90	1,15	1,35	1,55	1,75	1,90	1,25	1,40	1,55	1,75	1,90	1,60
	Расчетное сечение проволоки, мм <sup>2</sup>																
2,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	6,693	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,35	7,141	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,55	7,589	7,829	8,325	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,75	8,037	—	8,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,00	8,597	8,891	9,451	10,65	10,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	9,157	—	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	9,717	10,07	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	10,28	—	11,33	—	12,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,00	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20	—	—	—	—	—	—	—	—
5,30	11,51	—	12,70	—	14,29	—	16,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,60	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6,00	13,08	—	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,30	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,70	14,65	—	16,20	—	18,21	—	20,56	—	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,10	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,67	34,64	—	—
7,50	16,44	—	18,20	—	20,45	—	23,08	—	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8,00	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,50	18,68	—	20,70	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9,00	19,80	20,69	21,95	23,30	24,65	26,54	27,80	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	20,92	—	23,30	—	26,05	—	29,38	—	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10,0	22,04	23,05	23,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,8	23,38	—	25,95	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,50
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,8	26,07	—	28,95	—	32,49	—	36,62	—	41,34	—	46,34	—	52,24	—	57,14	—	63,22
12,5	27,64	24,95	30,70	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Рис. П.2.1. Продолжение (начало на с. 123, окончание на с. 125)

Номинальный размер проволоки по большей стороне $b$ , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне $a$ , мм												
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,80	4,00	4,10	4,25	4,40	4,50	4,70	4,75
	Расчётное сечение проволоки, мм <sup>2</sup>												
10,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11,2	-	36,97	-	39,21	41,14	-	3,94	-	46,74	-	49,54	-	52,34
11,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11,8	-	-	-	41,34	-	-	46,34	-	-	-	52,24	-	-
12,5	-	41,33	-	43,83	46,02	-	49,14	-	52,27	-	55,39	-	58,52
13,2	-	-	-	46,31	-	-	51,94	-	-	-	58,54	-	-
13,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14,0	-	46,35	-	49,15	51,95	-	55,14	-	58,64	-	62,14	-	65,64
14,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15,0	-	-	-	52,70	-	-	59,14	-	-	-	66,64	-	-
15,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16,0	-	53,05	-	56,25	59,14	-	63,14	-	67,14	-	71,14	-	75,14
16,8	54,62	-	58,82	-	-	63,36	-	68,02	-	73,06	-	78,10	-
18,0	58,56	-	63,06	-	-	67,92	-	72,94	-	78,34	-	83,74	-
19,5	63,48	-	68,35	-	-	73,62	-	79,09	-	84,94	-	90,79	-
20,0	-	-	-	-	-	-	79,52	-	-	-	-	-	-
22,0	71,68	-	77,18	-	-	83,12	-	89,34	-	95,94	-	102,54	-
25,0	81,52	-	87,77	-	-	94,52	99,52	101,64	-	109,14	-	116,40	-
26,3	-	-	92,36	-	-	99,46	-	106,97	-	114,14	-	122,75	-
28,0	-	-	-	-	-	105,92	111,94	113,94	-	122,34	-	130,74	-
30,0	-	-	-	-	-	113,53	119,52	122,14	-	131,14	-	140,14	-
32,0	-	-	-	-	-	-	-	130,34	-	139,94	-	149,54	-
35,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	153,14	-	163,64	-

Номинальный размер проволоки по большей стороне $b$ , мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне $a$ , мм												
	5,00	5,10	5,31	5,50	5,60	6,00	6,80	7,00	8,00	9,00	10,0	11,0	12,5
	Расчётное сечение проволоки, мм <sup>2</sup>												
10,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96,34	-	-	-
11,2	55,14	-	58,50	-	61,86	-	-	-	-	-	-	-	-
11,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	103,54	-	-	-
11,8	58,14	-	-	-	65,22	-	-	-	-	-	-	-	-
12,5	61,64	-	65,39	-	69,14	-	-	-	99,14	111,64	124,14	136,66	155,41
13,2	65,14	-	-	-	73,06	-	-	-	-	-	-	-	-
13,5	-	-	-	-	-	-	-	93,64	107,14	120,64	-	-	-
14,0	69,14	-	73,34	-	77,54	-	-	-	-	-	-	-	-
14,5	-	-	-	-	-	-	93,39	100,64	115,14	129,64	-	-	-
15,0	74,14	-	-	-	83,14	-	-	-	-	-	-	-	-
15,6	-	-	-	-	-	-	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	-	-
16,0	79,14	-	83,94	-	88,74	95,14	-	-	127,14	-	-	-	-
16,8	-	84,82	-	91,54	-	99,94	108,34	116,74	133,54	-	-	-	-
18,0	-	90,94	-	98,14	-	107,14	116,14	125,14	143,14	-	-	-	-
19,5	-	98,59	-	106,39	-	116,14	125,89	135,64	155,14	-	-	-	-
20,0	99,14	-	-	-	-	119,14	-	-	159,14	-	-	-	-
22,0	-	111,34	-	120,14	-	131,14	142,14	153,14	-	-	-	-	-
25,0	124,14	126,64	-	136,64	-	149,14	161,64	174,14	-	-	-	-	-
26,3	-	133,27	-	143,79	-	158,94	170,09	183,24	-	-	-	-	-
28,0	-	141,94	-	153,14	-	167,14	181,14	195,14	-	-	-	-	-
30,0	149,14	152,14	-	164,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32,0	-	162,34	-	175,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. П.2.1. Окончание (начало см. на с. 123 и 124)

*Примечания*

1. Проволока с размерами, расположенными в пределах, ограниченных сверху и снизу линией —, может поставляться для изготовления обмоточного провода марок ПЭТВП и ПЭТП-155 с нагревостойкой высокопрочной эмалевой изоляцией.

2. Проволока с размерами, расположенными в пределах, ограниченных линией —, может поставляться для изготовления обмоточного провода марок ПСД и ПСДК и изоляцией из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким или кремнийорганическим лаком.

3. Проволока с размерами, расположенными в пределах, ограниченных линией - - - -, может поставляться для изготовления обмоточного провода марки ПСДКТ с утоненной изоляцией из бесщелочного стекловолокна и пропиткой кремнийорганическим лаком.

### Приложение 3

Таблица П.3.1

Номинальные размеры, мм, и расчетные сечения, мм<sup>2</sup>, шин

b, мм	a, мм																	
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7	8	9	10	11	12,5	14	16	18	20	25	30
16	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	175,1	199,1	233,1	255,1	–	–	–	–
20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	199,1	219,1	249,1	279,1	319,1	359,1	399,1	–	–
25	–	–	–	–	–	–	–	199,1	224,1	249,1	274,1	311,6	349,1	399,1	449,1	499,1	624,1	–
30	–	–	–	–	179,1	194,1	209,1	239,1	269,1	299,1	329,1	374,1	419,1	479,1	539,1	599,1	749,1	899,1
32	–	–	–	–	191,1	207,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
35	–	–	174,1	191,6	209,1	226,6	–	279,1	–	349,1	–	436,6	–	–	–	699,1	–	–
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	259,1	279,1	319,1	359,1	399,1	439,1	499,1	559,1	639,1	719,1	799,1	999,1	1199,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	291,6	314,1	359,1	404,1	449,1	494,1	561,6	629,1	719,1	809,1	899,1	–	1349,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	324,1	349,1	399,1	449,1	499,1	549,1	624,1	699,1	799,1	899,1	999,1	–	–
55	219,5	246,6	274,1	301,6	329,1	356,6	384,1	429,1	494,1	549,1	–	686,6	–	879,1	–	1099,1	–	–
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	389,1	439,1	479,1	539,1	599,1	–	749,1	–	959,1	–	1199,1	–	–
65	259,5	291,6	324,1	–	389,1	–	454,1	–	584,1	649,1	–	811,6	–	1039,1	–	–	–	–
70	279,5	314,1	349,1	–	–	–	–	559,1	629,1	699,1	–	874,1	–	1119,1	–	–	–	–
75	–	–	–	–	–	–	–	599,1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
80	319,5	359,1	399,1	–	479,1	–	559,1	639,1	–	799,1	–	999,1	–	–	–	–	–	–
90	359,5	404,1	449,1	–	539,1	–	629,1	719,1	–	899,1	–	1124,1	–	–	–	–	–	–
100	399,5	449,1	499,1	–	599,1	–	699,1	799,1	–	999,1	–	1249,1	–	–	–	–	–	–
120	–	–	–	–	–	–	–	959,1	–	1199,1	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. Расчетные сечения указаны с учетом закругления углов.

Приложение 4

Таблица П.4.1

Максимальные размеры провода ПЭТВСД

b, мм	b <sub>виз</sub> , мм		a <sub>виз</sub> , мм											
	при номинальном размере a, мм													
	0,9–2,0	2,12–3,55	0,9	1,0	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
2,80	3,26	–	–	1,54	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,15	3,61	–	–	–	–	–	–	–	–	1,96	2,06	2,16	–	2,35
4,50	4,96	5,02	–	–	–	–	–	–	–	–	2,06	2,16	–	2,36
4,75	5,21	5,27	–	1,58	–	1,70	–	1,83	–	1,98	–	2,18	–	2,38
5,0	5,46	5,52	–	1,58	–	1,70	–	1,83	1,90	1,98	2,08	2,18	2,28	2,38
5,6	6,06	6,12	–	1,58	–	1,70	–	1,83	1,90	1,98	2,08	2,18	2,28	2,38
6,0	6,46	6,52	–	1,60	–	1,72	–	1,85	–	2,00	–	2,20	–	2,40
6,3	6,78	6,84	–	–	–	–	–	–	1,92	–	–	2,20	2,22	2,40
7,1	7,58	7,64	1,32	1,60	1,66	1,72	1,78	1,85	1,92	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40
7,5	7,98	8,04	–	1,62	–	1,74	–	1,87	–	2,02	–	2,22	–	2,42
8,0	8,48	8,54	–	–	–	–	1,8	1,87	1,94	2,02	2,12	2,22	2,32	2,42
b, мм	b <sub>виз</sub> , мм		a <sub>виз</sub> , мм											
	при номинальном размере a, мм													
	0,9–2,0	2,12–3,55	1,9	2,0	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,8	3,0	3,15	3,35	3,55
3,15	3,61	–	–	2,56	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,5	4,96	5,02	2,46	2,56	2,68	–	–	3,06	–	–	–	–	–	–
4,75	5,21	5,27	–	2,58	–	2,83	–	3,09	–	3,39	–	–	–	–
5,0	5,46	5,52	2,48	2,58	2,70	2,83	–	3,09	3,24	3,39	3,61	–	–	–
5,6	6,06	6,12	2,48	2,58	2,70	2,83	–	3,09	3,24	3,39	3,61	–	–	–
6,0	6,46	6,52	–	2,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
6,3	6,78	6,84	–	–	2,72	2,85	2,97	3,11	3,26	3,41	–	3,78	–	–
6,7	7,18	7,24	–	–	–	–	–	3,11	–	–	–	–	–	4,18
7,1	7,58	7,64	2,5	2,6	2,72	2,85	2,97	3,11	3,26	3,41	3,68	3,78	3,98	–
7,5	7,98	8,04	–	2,62	–	2,87	–	3,13	–	3,43	–	3,80	–	–
8,0	8,48	8,54	2,52	2,62	2,74	2,87	2,99	3,13	3,28	3,43	3,65	3,8	–	–



## Приложение 5

### Таблицы и кривые намагничивания сталей

Таблица П.5.1

#### Основная таблица намагничивания Сталь 2013

$B$ , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
$H$ , А/м										
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1,0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11200	11800	12400
1,9	13000	13600	14200	14800	15600	16500	17300	18100	18900	19800
2,0	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2,1	60000	67000	74000	81000	88000	95000	102000	109000	116000	123000
2,2	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2,3	210000	218000	226000	234000	242000	250000	258000	266000	274000	282000
2,4	290000	298000	306000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

## Приложение 6

Таблица П.6.1

### Основная таблица намагничивания Сталь марок 2211 и 2312

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1,0	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100
1,6	3400	3600	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6500	7100
1,7	7700	8200	8900	9400	10000	10600	11100	11700	12200	12800
1,8	13400	14000	14600	15200	15800	16400	17000	17600	18200	18800
1,9	19400	20000	21800	23700	25700	27800	30000	32200	34400	36600
2,0	38800	41000	43200	45400	47600	49800	52000	54500	57500	60500
2,1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304000	312000	320000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000

## Приложение 7

Таблица П.7.1

### Основная таблица намагничивания Сталь 2411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, A/м									
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	85	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	304	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1000	1070	1150
1,4	1230	1320	1420	1520	1630	1750	1870	2010	2160	2320
1,5	2500	2680	2870	3080	3300	3540	3800	4090	4380	4700
1,6	5000	5380	5760	6200	6650	7120	7650	8200	8800	9400
1,7	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13100	13700	14300	14900
1,8	15600	16200	16800	17500	18300	19100	20000	20900	21900	22900
1,9	23900	25000	26200	27400	28700	30000	32000	36000	42000	50000
2,0	59000	68000	77000	86000	95000	104000	113000	122000	131000	140000
2,1	149000	158000	167000	176000	185000	194000	203000	212000	221000	230000
2,3	329000	333800	347000	356000	365000	374000	383000	392000	401000	410000
2,4	419000	428000	437000	446000	455000	464000	473000	482000	491000	500000

## Приложение 8

Таблица П.8.1

**Основная таблица намагничивания**  
**Листовая сталь Ст3 толщиной 1–2 мм (для полюсов)**

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,1	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2	140	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,3	180	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,4	210	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5	250	–	–	–	–	275	–	–	–	–
0,6	295	–	–	–	–	320	–	–	–	–
0,7	345	–	–	–	–	375	–	–	–	–
0,8	405	–	–	–	–	440	–	–	–	–
0,9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1,0	570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
1,1	690	703	720	731	748	760	775	790	808	825
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1015	1045
1,3	1080	1112	1145	1175	1220	1260	1300	1350	1393	1450
1,4	1490	1530	1595	1645	1700	1750	1835	1920	2010	2110
1,5	2270	2450	2560	2710	2880	3050	3200	3400	3650	3750
1,6	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5580	5950	6230	6600
1,7	7050	7530	7950	8400	8850	9320	9800	10300	10800	11400
1,8	11900	12400	13000	13500	14100	14800	15600	16200	17000	17800
1,9	18800	19700	20700	21500	22600	23500	24500	25600	26500	27500
2,0	29000	30200	31500	32800	34200	36100	38000	–	–	–

*Рис. П.9.1. Кривые намагничивания зубцов синхронных машин  
и машин постоянного тока из стали марки 2013*

*Рис. П.10.1.* Кривые намагничивания зубцов синхронных машин и машин постоянного тока из сталей марок 2211, 2312 и 2411

## Приложение 11

Таблица П.11.1

Удельные потери в листовой электротехнической стали при  $B = 1$  Тл и  $f = 50$  Гц

Марка стали	1211		1212		1311	1411	1412	1413	1511	1512	1513	3413	2011	2012	2014
	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$P_{1,0/50}$ , Вт/кг	5,8	3,3	5,4	3,1	2,5	2,0	1,8	1,55	1,55	1,4	1,25	0,8	3,5	2,9	2,5

## Содержание

Введение.....	3
1. Общие сведения.....	5
2. Исходные данные для проектирования.....	7
3. Выбор главных размеров.....	8
4. Сердечник и обмотка статора.....	13
5. Воздушный зазор и полюсы ротора.....	23
6. Расчет пусковой обмотки.....	26
7. Расчет магнитной цепи.....	28
8. Параметры обмотки статора.....	34
9. Определение магнитодвижущей силы (МДС) обмотки возбуждения при нагрузке.....	38
10. Расчет обмотки возбуждения.....	41
11. Параметры обмоток и постоянные времени.....	46
12. Масса активных материалов.....	52
13. Потери и коэффициента полезного действия.....	54
14. Тепловой расчет.....	56
15. Характеристики синхронного двигателя.....	57
16. Рисунки.....	62
17. Пример расчета трехфазного синхронного двигателя.....	84
Литература.....	121
Приложения.....	122



Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Хабибуллин Дамир Абдулхаевич  
Тодарев Валентин Васильевич  
Веппер Леонид Владимирович**

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯВНОПОЛЮСНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН**

**Методические указания  
к курсовому проекту по дисциплине  
«Электрические машины» для студентов  
специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение»  
и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Н. И. Жукова*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 14.05.08.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Ризография. Усл. печ. л. 8,14. Уч.-изд. л. 7,02.

Изд. № 152.

E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)  
<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.  
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.