

11.13.326

КОНТРОЛЬНЫЙ

Пролетарии всех стран, соединяйтесь!

ЭКЗЕМПЛЯР

Инженерно-Промышленная Библиотека

Д В П

ЧЕЧЕТ Ю. С., проф.

Т. 2-5
57

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

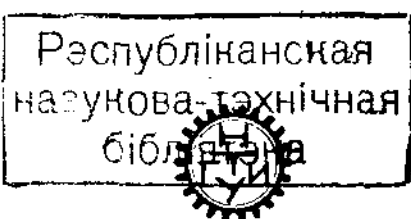
Часть IV

РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ

с 114 фигурами в тексте

11.13.326
155064



47.07.57
(10)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
Москва—1931.



Б. Серия 4

№ V—51

Ленинградский Областлит № 69162.

Зах. № 1578.

Тираж 10100 экз. 15 п. л.

ПРЕДИСЛОВИЕ ко 2-му ИЗДАНИЮ.

Настоящее издание IV части „Расчета электрических машин и трансформаторов“ подверглось столь значительной переработке, что в сущности представляет собой вновь написанную книгу. Из главнейших дополнений можно указать на следующие главы и отделы: статорные и роторные обмотки, таблицы роторных обмоток, новейшие данные о размерах и изоляции обмоточных проводников, аномальные конструкции, механический расчет, нормы и стандарты СССР, таблицы двигателей и т. д. Глава XI (Примеры расчета) также написана вновь. Число рисунков возросло до 114 (против 80).

Всем, указывавшим мне на желательность тех или иных дополнений, я приношу глубокую благодарность и надеюсь, что настоящее издание встретит такой же благосклонный прием, какой в свое время встретило 1-е издание этой книги.

Ю. Чет.

Москва. Декабрь 1930 г.

Г Л А В А I.

Общие данные для расчета асинхронных двигателей.

При проектировании асинхронных двигателей обычно известны следующие данные: мощность—в kW (иногда также—хотя этого следует избегать,—в PS), напряжение—в вольтах, частота сети—в пер./сек, число оборотов—в об./мин (соответствующее синхронной скорости, т.-е. скорости вращения основного магнитного потока), тип машины (открытый, защищенный, закрытый), способ соединения с рабочей машиной (непосредственное сцепление, шкив, зубчатая передача), характер работы, соединение фаз обмотки и т. д. Все остальные величины определяются или путем сравнения с существующими конструкциями или путем непосредственного расчета. Здесь, как и для других электрических машин, теоретическими изысканиями и практикой выработан целый ряд нормальных величин, отступать от которых приходится лишь в очень редких случаях. И здесь нужно стремиться к тому, чтобы проектируемая машина прежде всего была экономичной, так как иначе она, даже при высоких качествах своей работы, не сможет выдержать конкуренции с другими изделиями.

1. Напряжение и частота.

Электротехническим Сектором (IX ВЭС) 1-го Всесоюзного Энергетического Съезда утверждена следующая шкала эксплуатационных напряжений для трехфазного тока при частоте 50 пер/сек¹⁾

	<u>12</u>	24	120	127	<u>220</u>	<u>380</u>	500	V
3	<u>6</u>	10	20	<u>36</u>	<u>60</u>	<u>100</u>	150	<u>200</u> kV.

Подчеркнутые напряжения должны рассматриваться как рекомендуемые предпочтительно как для новых установок, так и для значительных расширений существующих установок. Для асинхронных двигателей из всей этой шкалы имеют значение следующие напряжения

120	127	<u>220</u>	<u>380</u>	500	V
	3	<u>6</u>	10		kV

По „Нормам Союза германских электротехников“ стандартными являются напряжения²⁾

				<u>24</u>	<u>42</u>	125	<u>220</u>	<u>380</u>	500	V				
1	3	<u>6</u>	10	<u>15</u>	<u>20</u>	30	45	<u>60</u>	<u>80</u>	100	150	200	300	kV.

Для асинхронных двигателей имеют значения

125	<u>220</u>	<u>380</u>	500	V
1	3	<u>6</u>	10	kV.

Что касается однофазных асинхронных двигателей, то они строятся на те же напряжения, так как при существовании в настоящее время почти исключительно

¹⁾ „Электричество“. 1928, стр. 238.

²⁾ „Электричество“. 1928, стр. 167.

трехфазных сетей, эти двигатели присоединяются к каким-либо двум проводам, между которыми действует как-раз междуфазовое напряжение, величины которого были приведены выше.

Что касается частоты переменного тока, то она установлена в 50 пер./сек и лишь для электрических дорог допускается еще $16\frac{2}{3}$ пер./сек.

2. Число оборотов и число полюсов.

При проектировании асинхронных двигателей число полюсов не может быть взято произвольным (как это отчасти было в случае машин постоянного тока), так как оно связано с числом оборотов мотора уравнением

$$f = \frac{pn_s}{60} \quad (1)$$

Здесь — частота сети; p — число пар полюсов; n_s — синхронное число об./мин. При $f = 50$, из уравнения (1) следует:

$$p = \frac{3000}{n_s} \quad (2)$$

В приведенной ниже таблице дана зависимость между числами полюсов ($2p$) и числами оборотов (n_s), применяемыми обычно на практике и нормализованными

n_s	$2p$	n_s	$2p$	n_s	$2p$
3 000	2	375	16	150	40
1 500	4	300	20	125	48
1 000	6	250	24	107	56
750	8	214	28	94	64
600	10	188	32	83	72
500	12	167	36	75	80

Союзом германских электротехников (Regeln für die Bewertung und Prüfung von elektr. Maschinen, § 10, изд. 1923 г.).

При этом германские нормы рекомендуют по возможности избегать для n_s значений: 214, 167, 107 и 83.

Так как чем больше число оборотов мотора, тем выше его коэффициент полезного дей-

ствия ¹⁾, то следует всегда стремиться к тому, чтобы конструировать машину с возможно большей скоростью, допускаемой в данных условиях.

Нормальными для асинхронных моторов следует считать числа оборотов следующей таблицы.

Мощность kW	Число об./мин.
0,1 — 1	3 000
1,1 — 7,5	1 500
7,6 — 25	1 000
26 — 100	750
101 — 1 000	500
свыше 1 000	300

3. Коэффициент полезного действия.

Наибольший коэффициент полезного действия (к. п. д.) лежит обычно вблизи нормальной мощности машины. К. п. д. правильно рассчитанного и хорошо сконструированного мотора, при изменении его нагрузки от $\frac{2}{4}$ до $\frac{5}{4}$ нормальной, должен изменяться лишь незначительно.

Для однофазных асинхронных двигателей к. п. д. значительно меньше, чем для трехфазных, а из последних он для моторов с короткозамкнутым ротором несколько больше, чем для моторов, имеющих ротор с кольцами.

В приведенных ниже таблицах указаны средние значения для величины к. п. д. различных двигателей. К. п. д. для стандартных двигателей указаны в § 5 этой главы.

К. п. д. для двигателей, строящихся на заводах ГЭТ²⁾ указаны в конце книги, в приложении II.

¹⁾ При слишком больших скоростях (для малых машин при 3 000 об./мин., для больших 1 000 — 3 000 об./мин.) из-за увеличения сопротивления воздуха к. п. д. снова уменьшается.

а) Асинхронные двигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором.

(По данным Союза герм. эл. и каталога завода SSW, Berlin — Siemensstadt.)

Номинальная мощность kW	Коэффициент полезного действия при $n =$					
	3 000	1 500	1 000	750	600	500
0,125	0,67	0,70	0,67	—	—	—
0,25	0,71	0,735	0,705	0,695	—	—
0,5	0,765	0,77	0,755	0,72	—	—
0,75	0,785	0,795	0,775	0,75	—	—
1,0	0,80	0,815	0,795	0,77	0,756	—
1,5	0,82	0,83	0,815	0,79	0,785	—
2,0	0,83	0,835	0,825	0,805	0,8	0,79
3,5	0,845	0,85	0,84	0,82	0,82	0,81
5,0	0,86	0,87	0,86	0,84	0,84	0,83
7,5	0,865	0,875	0,865	0,845	0,845	0,84
10	0,87	0,88	0,87	0,855	0,855	0,845
15	0,87	0,88	0,87	0,865	0,86	0,855
20	0,88	0,885	0,88	0,875	0,87	0,865
30	0,89	0,895	0,89	0,885	0,88	0,875
40	0,895	0,9	0,895	0,895	0,89	0,885
50	0,9	0,905	0,905	0,9	0,895	0,89
75	0,905	0,91	0,91	0,91	0,905	0,905
100	0,91	0,915	0,915	0,915	0,91	0,91

б) Асинхронные двигатели трехфазного тока с ротором с контактными кольцами.

(По данным Союза герм. эл. и каталога завода SSW, Berlin — Siemensstadt.)

Номинальная мощность kW	Коэффициент полезного действия при $n =$						
	3 000	1 500	1 000	750	600	500	375
1,0	0,765	0,77	0,76	0,74	0,735	—	—
1,5	0,8	0,8	0,78	0,76	0,75	—	—
2,0	0,81	0,81	0,80	0,78	0,775	0,76	—
3,5	0,825	0,83	0,82	0,80	0,80	0,79	—
5,0	0,825	0,85	0,835	0,815	0,815	0,8	—
7,5	0,835	0,855	0,845	0,84	0,84	0,83	—
10	0,845	0,865	0,86	0,85	0,85	0,84	—
15	0,855	0,88	0,87	0,86	0,855	0,855	—
20	0,86	0,885	0,88	0,875	0,87	0,865	—
30	0,89	0,895	0,89	0,885	0,88	0,875	—
40	0,895	0,90	0,895	0,895	0,89	0,885	—
50	0,90	0,905	0,905	0,90	0,895	0,89	—
75	0,905	0,91	0,91	0,91	0,905	0,905	—
100	0,91	0,915	0,915	0,915	0,91	0,91	0,905
125	0,915	0,92	0,92	0,915	0,915	0,915	0,91
160	0,92	0,925	0,925	0,92	0,92	0,92	0,915
200	0,925	0,93	0,93	0,925	0,925	0,925	0,92
250	0,93	0,935	0,935	0,93	0,93	0,93	0,925
500	0,94	0,945	0,945	0,94	0,94	0,94	0,935
750	0,945	0,95	0,95	0,945	0,945	0,945	0,94
1 000	0,95	0,955	0,955	0,95	0,95	0,95	0,945

с) Асинхронные двигатели однофазного тока с короткозамкнутым ротором.
(По данным каталога завода Sachsenwerk, Niedersedlitz — Dresden.)

Номинальная мощность kW	Коэффициент полезного действия при $n =$			
	3 000	1 500	1 000	750
0,125	0,55	0,56	0,54	0,52
0,25	0,61	0,62	0,60	0,58
0,5	0,67	0,68	0,64	0,62
0,75	0,69	0,70	0,67	0,65
1,0	0,70	0,71	0,68	0,67
1,5	0,72	0,73	0,70	0,69
2,0	0,74	0,75	0,72	0,71

д) Асинхронные двигатели однофазного тока с ротором с контактными кольцами.
(По данным каталога завода Sachsenwerk, Niedersedlitz — Dresden.)

Номинальная мощность kW	Коэффициент полезного действия при $n =$				
	3 000	1 500	1 000	750	600
1,0	0,70	0,71	0,67	0,66	0,62
1,5	0,71	0,725	0,70	0,68	0,64
2,0	0,73	0,74	0,71	0,70	0,66
3,5	0,76	0,77	0,74	0,73	0,71
5,0	0,78	0,79	0,76	0,75	0,73
7,5	0,80	0,81	0,78	0,77	0,75
10,0	0,82	0,83	0,80	0,79	0,77
15	0,83	0,84	0,81	0,80	0,79
20	0,84	0,85	0,82	0,81	0,80
30	0,85	0,86	0,83	0,82	0,81
40	0,86	0,87	0,84	0,83	0,82
50	0,87	0,88	0,85	0,84	0,83
75	0,88	0,89	0,86	0,85	0,84
100	0,885	0,895	0,865	0,855	0,845
125	0,89	0,90	0,87	0,86	0,85
160	0,895	0,905	0,875	0,865	0,855
200	0,90	0,91	0,88	0,87	0,86

Как мы уже указывали, величина к. п. д. при изменениях нагрузки не остается постоянной. Изменение к. п. д. в зависимости от нагрузки двигателя дает следующая таблица, взятая из каталога SSW.

При $\frac{1}{4}$ нагрузки %	При $\frac{2}{4}$ нагрузки %	При $\frac{3}{4}$ нагрузки %	При $\frac{4}{4}$ нагрузки %	При $\frac{5}{4}$ нагрузки %	При $\frac{6}{4}$ нагрузки %
88	92,5	93,5	94	93,5	92,5
87	91,5	92,5	93	92,5	91,5
86	91	92	92	91,5	90
85	90	91	91	90	88,5
83	89	90	90	89	87
82	88	89	89	88	86
80	87	88	88	87	85
79	86	87	87	85,5	83
77	84,5	86	86	84,5	82
76	83,5	85	85	83,5	81
74,5	82,5	84	84	82,5	80
73	81,5	83	83	81,5	79
71,5	80,5	82	82	80	77
70,5	79,5	81	81	79	76
69	78,5	80	80	78	75
67	77	79	79	77	74

4. Коэффициент мощности.

Так как каждый асинхронный двигатель представляет собой индуктивное сопротивление, то между приложенным к его зажимам напряжением и подводимым током всегда существует некоторый сдвиг фаз, характеризуемый так называемым коэффициентом мощности, т. е. косинусом угла между векторами тока и напряжения ($\cos \varphi$).

а) Асинхронные двигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором.

(По данным Союза герм. эл. и каталога завода SSW, Berlin — Siemensstadt.)

Номинальная мощность kW	Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) для $n =$					
	3 000	1 500	1 000	750	600	500
0,125	0,74	0,69	0,62	—	—	—
0,25	0,81	0,74	0,68	0,64	—	—
0,5	0,84	0,76	0,73	0,69	—	—
0,75	0,855	0,77	0,75	0,70	—	—
1,0	0,87	0,81	0,77	0,71	0,68	—
1,5	0,89	0,83	0,78	0,73	0,7	—
2,0	0,885	0,84	0,785	0,75	0,715	0,69
3,5	0,89	0,855	0,8	0,77	0,745	0,71
5,0	0,89	0,87	0,84	0,82	0,8	0,77
7,5	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	0,78
10	0,89	0,87	0,85	0,84	0,82	0,79
15	0,89	0,87	0,85	0,84	0,82	0,79
20	0,9	0,88	0,86	0,85	0,82	0,79
30	0,9	0,89	0,87	0,86	0,83	0,8
40	0,91	0,9	0,88	0,87	0,84	0,81
50	0,91	0,9	0,88	0,87	0,85	0,82
75	0,91	0,9	0,89	0,88	0,86	0,84
100	0,91	0,9	0,89	0,88	0,86	0,85

б) Асинхронные двигатели трехфазного тока с ротором с контактными кольцами.

(По данным Союза герм. эл. и каталога завода SSW, Berlin — Siemensstadt.)

Номинальная мощность kW	Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) для $n =$					
	3 000	1 500	1 000	750	600	500
1,0	0,88	0,77	0,71	0,66	0,61	—
1,5	0,85	0,8	0,74	0,69	0,64	—
2,0	0,86	0,82	0,76	0,72	0,68	0,64
3,5	0,86	0,84	0,79	0,76	0,71	0,68
5,0	0,87	0,84	0,81	0,78	0,74	0,71
7,5	0,87	0,85	0,83	0,81	0,79	0,75
10	0,88	0,86	0,84	0,82	0,8	0,77
15	0,89	0,87	0,85	0,84	0,81	0,78
20	0,9	0,88	0,86	0,85	0,82	0,79
30	0,9	0,89	0,87	0,86	0,83	0,81
40	0,9	0,9	0,88	0,87	0,84	0,82
50	0,91	0,9	0,88	0,87	0,85	0,83
75	0,91	0,9	0,89	0,88	0,86	0,85
100	0,91	0,9	0,89	0,88	0,86	0,85
125	0,92	0,91	0,9	0,89	0,87	0,86
160	0,92	0,91	0,9	0,89	0,87	0,86
200	0,92	0,91	0,9	0,89	0,88	0,86
250	0,92	0,91	0,9	0,89	0,88	0,87
500	0,93	0,92	0,91	0,9	0,89	0,88
750	0,935	0,925	0,915	0,905	0,895	0,885
1 000	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9	0,89

с) Асинхронные двигатели однофазного тока с короткозамкнутым ротором.

(По данным каталога завода Sachsenwerk, Niedersedlitz — Dresden.)

Номинальная мощность kW	Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) для $n =$			
	3 000	1 500	1 000	750
0,125	0,58	0,56	0,52	0,48
0,25	0,63	0,62	0,57	0,52
0,5	0,68	0,67	0,64	0,57
0,75	0,71	0,69	0,65	0,59
1,0	0,73	0,71	0,66	0,61
1,5	0,74	0,73	0,69	0,64
2	0,75	0,74	0,71	0,66

д) Асинхронные двигатели однофазного тока с ротором с контактными кольцами.

(По данным каталога завода Sachsenwerk, Niedersedlitz — Dresden.)

Номинальная мощность kW	Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) для $n =$				
	3 000	1 500	1 000	750	600
1,0	0,72	0,7	0,65	0,6	0,56
1,5	0,73	0,72	0,67	0,62	0,58
2,0	0,74	0,73	0,69	0,64	0,6
3,5	0,77	0,76	0,72	0,67	0,63
5,0	0,79	0,77	0,74	0,69	0,65
7,5	0,79	0,78	0,75	0,7	0,66
10	0,8	0,79	0,76	0,71	0,67
15	0,81	0,8	0,78	0,74	0,69
20	0,82	0,81	0,79	0,77	0,73
30	0,83	0,82	0,81	0,78	0,74
40	0,84	0,83	0,82	0,79	0,75
50	0,85	0,84	0,83	0,8	0,76
75	0,86	0,85	0,835	0,81	0,77
100	0,87	0,855	0,84	0,815	0,78
125	0,88	0,86	0,85	0,82	0,79
160	0,89	0,87	0,86	0,83	0,8
200	0,9	0,88	0,87	0,84	0,81

Благодаря этому, потребляемый мотором ток имеет безваттную составляющую, наличие которой является одним из серьезнейших недостатков этого типа машин. Коэффициент мощности не представляет собой постоянной величины даже для отдельного мотора и изменяется с его нагрузкой, достигая своей максимальной величины при полной нагрузке или иногда даже при некоторой перегрузке. Значения коэффициентов мощности при полной нагрузке в зависимости от типа и величины двигателей приведены в помещаемых выше таблицах, из которых видно, что величина $\cos \varphi$ так же, как и величина к. п. д., увеличивается при возрастании числа оборотов мотора.

Коэффициенты мощности для стандартных двигателей указаны в § 5 этой главы.

Коэффициенты мощности для двигателей, изготавливаемых заводами ГЭТа, указаны в конце книги, в приложении II.

Изменение величины $\cos \varphi$ в зависимости от степени загрузки двигателя видно из следующей таблицы, взятой из каталога SSW.

При $\frac{1}{4}$ нагрузки	При $\frac{2}{4}$ нагрузки	При $\frac{3}{4}$ нагрузки	При $\frac{4}{4}$ нагрузки	При $\frac{5}{4}$ нагрузки	При $\frac{6}{4}$ нагрузки
0,74	0,87	0,90	0,91	0,91	0,90
0,72	0,85	0,89	0,90	0,90	0,89
0,67	0,82	0,87	0,89	0,89	0,88
0,63	0,80	0,86	0,88	0,88	0,87
0,60	0,78	0,85	0,87	0,87	0,86
0,58	0,77	0,84	0,86	0,87	0,86
0,56	0,74	0,82	0,85	0,86	0,86
0,54	0,72	0,81	0,84	0,85	0,85
0,50	0,70	0,80	0,83	0,84	0,84
0,49	0,69	0,78	0,82	0,83	0,83
0,48	0,68	0,77	0,81	0,82	0,82
0,47	0,67	0,76	0,80	0,81	0,81
0,46	0,65	0,75	0,79	0,80	0,80
0,44	0,63	0,73	0,78	0,80	0,80
0,42	0,62	0,72	0,77	0,79	0,79
0,40	0,60	0,70	0,76	0,78	0,78

5. Стандарты асинхронных двигателей.

Стандарты асинхронных двигателей, выработанные ЦЭС'ом и изданные в 1921 г. ¹⁾, страдают неполнотой (нормализованы лишь частота, мощность, напряжения и числа оборотов) и совершенно не затрагивают чисто электрических (к. п. д., $\cos \phi$, пусковой ток, пусковой момент, опрокидывающий момент) и механических (величина воздушного промежутка) свойств машины. Поэтому в настоящее время Комитет по стандартизации при СТО выработал новый стандарт как для двигателей с короткозамкнутым ротором, (ОСТ 678), так и для двигателей с ротором, имеющим кольца (ОСТ. 679). Пока стандартизованы лишь двигатели открытого типа и, притом, мощностью от 0,1 до 300 kW. Приведем сперва стандарт для двигателей с короткозамкнутым ротором: (стр. 12).

Настоящий стандарт распространяется на асинхронные трехфазные электродвигатели открытого типа с короткозамкнутым ротором, предназначенные для продолжительной работы от сети в 50 пер./сек.

Примечание. Впредь до утверждения стандарта на технические условия и допуски, электродвигатели должны удовлетворять „Правилам и нормам для испытания электрических машин“, одобренным I Всесоюзным энергетическим (IX Электротехническим) съездом.

Электродвигатели с номинальными напряжениями статорной обмотки, напечатанные в таблице жирным шрифтом, являются рекомендуемыми.

Применение электродвигателей с напряжениями, напечатанными в таблице обыкновенным шрифтом, предлагается избегать.

1. Пусковые токи статора, приведенные в таблице, соответствуют номинальному напряжению статора и рабочему соединению его обмоток.

2. Пусковые моменты и максимальные вращающие моменты определяются из круговой диаграммы электродвигателя, построенной по данным опытов холостого хода и короткого замыкания, и соответствуют номинальному напряжению статора и рабочему соединению его обмоток.

Номинальный момент электродвигателя приближенно определяется из формулы:

$$M = \frac{W}{n_s} = \frac{\text{номинальная мощность в ваттах}}{\text{синхронное число оборотов в минуту}} = kgm$$

¹⁾ См. 1-е издание этой книги.

3. В случае применения специальных трансформаторов для целей пуска электродвигателей в ход или в случае пересоединения для целей пуска обмоток статора с рабочего соединения в треугольник на звезду и приключения электродвигателя к сети с номинальным напряжением статора, пусковые моменты электродвигателей, указанные в таблице, соответственно уменьшаются (в последнем случае пусковые моменты уменьшаются приблизительно в 3 раза).

Т а б л и ц а III.

Номинальная мощность электродвигателя		Коэффициент полезного действия при номинальной мощности					cos φ при номинальной мощности				
		Синхронное число оборотов в минуту					Синхронное число оборотов в минуту				
kW	л. с. прибл.	3 000	1 500	1 000	750	600	3 000	1 500	1 000	750	600
0,1	0,14	0,67	0,68	—	—	—	0,75	0,69	—	—	—
0,25	0,34	0,71	0,72	—	—	—	0,80	0,74	—	—	—
0,52	0,7	0,76	0,77	0,75	—	—	0,84	0,78	0,73	—	—
1	1,35	0,795	0,805	0,79	—	—	0,86	0,81	0,75	—	—
1,75	2,4	0,82	0,83	0,815	—	—	0,87	0,84	0,79	—	—
2,85	3,9	0,84	0,845	0,835	—	—	0,88	0,85	0,8	—	—
4,5	6,1	0,85	0,86	0,85	0,83	—	0,89	0,86	0,81	0,79	—
6,8	9,3	0,86	0,865	0,855	0,84	—	0,89	0,87	0,82	0,81	—
10	13,6	0,87	0,87	0,86	0,85	—	0,89	0,87	0,83	0,82	—
14,5	19,7	0,88	0,88	0,87	0,86	—	0,89	0,87	0,83	0,83	—
20,5	28	0,89	0,885	0,88	0,87	—	0,9	0,88	0,84	0,84	—
29	39,5	0,9	0,895	0,885	0,88	—	0,91	0,88	0,85	0,85	—
40	54,5	0,905	0,9	0,895	0,89	0,885	0,91	0,89	0,86	0,86	0,83
55	75,0	0,91	0,91	0,905	0,90	0,895	0,91	0,9	0,87	0,86	0,84
75	102	0,915	0,915	0,91	0,905	0,90	0,92	0,9	0,88	0,87	0,85
100	136	0,92	0,92	0,915	0,91	0,905	0,92	0,9	0,88	0,87	0,85

1. Указанные в таблице коэффициенты полезного действия определяются на основании метода отдельных потерь.

Впредь до утверждения стандарта на допуски для коэффициентов полезного действия, таковые должны удовлетворять требованиям § 49 п. 5 Правил и норм для испытания электрических машин, одобренных I Всесоюзным энергетическим (IX Электротехническим) съездом.

2. Впредь до утверждения стандарта на допуски коэффициентов мощности (cos φ), таковые должны удовлетворять требованиям § 49 п. 6 Правил и норм для испытания электрических машин, одобренных I Всесоюзным энергетическим (IX Электротехническим) съездом.

Теперь приведем стандарт на двигатели с контактными кольцами (стр. 14).

Настоящий стандарт распространяется на асинхронные трехфазные электродвигатели открытого типа с контактными кольцами, предназначенные для продолжительной работы от сети в 50 пер./сек. без регулировки числа оборотов.

Примечание. Впредь до утверждения стандарта на технические условия и допуски электродвигатели должны удовлетворять „Правилам и нормам для испытания электрических машин“, одобренным I Всесоюзным энергетическим (IX Электротехническим) съездом.

1. Асинхронные двигатели, приведенные в таблице I (стр. 14), по своей конструкции не предназначены для регулировки числа оборотов.

Таблица I.

Номинальная мощность электродвигателя		Синхронное число оборотов в минуту						Номинальное напряжение статора в вольтах при рабочем соединении обмоток статора						Номинальное напряжение между контактами клемм обмотки статора в вольтах
kW	л. с. прибл.							в звезду			в треугольник			
1,75	2,4	—	—	1 000	—	—	220	380	—	127	220	—	—	не более 200
2,85	3,9	—	1 500	1 000	—	—	220	380	500	127	220	—	—	
4,5	6,1	—	1 500	1 000	750	—	220	380	500	127	220	—	—	
6,8	9,3	—	1 500	1 000	750	—	220	380	500	127	220	—	—	
10	13,6	—	1 500	1 000	750	—	220	380	500	127	220	—	—	не более 300
14,5	19,7	3 000	1 500	1 000	750	—	220	380	500	127	220	—	—	
20,5	28	3 000	1 500	1 000	750	—	220	380	500	127	220	—	—	
29	39,5	3 000	1 500	1 000	750	—	220	380	500	127	220	380	—	
40	54,5	3 000	1 500	1 000	750	600	220	380	500	127	220	380	—	не более 500
55	75	3 000	1 500	1 000	750	600	220	380	500	127	220	380	500	
75	102	3 000	1 500	1 000	750	600	220	380	500	127	220	380	500	
100	136	3 000	1 500	1 000	750	600	220	380	500	127	220	380	500	
132	180	3 000	1 500	1 000	750	600	220	380	500	127	220	380	500	бухет установлен дополнительно
175	239	3 000	1 500	1 000	750	600	—	380	500	—	220	380	500	
230	313	3 000	1 500	1 000	750	600	—	380	500	—	220	380	500	
300	408	3 000	1 500	1 000	750	600	—	380	500	—	220	380	500	

Таблица II.

Номинальная мощность электродвигателя		Отношение максимального вращающего момента к номинальному моменту для электродвигателей с синхронным числом оборотов в минуту		Минимальный воздушный зазор в мм при синхронном числе оборотов в минуту	
kW	л. с. прибл.	3 000 1 500	1 000 750 600	3 000	1 500 1 000 750 600
1,75	2,4	Не менее	Не менее	—	0,3
2,85	3,9			—	0,35
4,5	6,1			—	0,4
6,8	9,3			—	0,45
10	13,6	2	1,8	—	0,45
14,5	19,7			0,7	0,5
20,5	28			0,8	0,55
29	39,5			0,9	0,6
40	54,5			0,9	0,6
55	75			1	0,7
75	102			1	0,7
100	136			1,2	0,8
132	180			1,2	0,8
175	239			1,3	0,9
230	313			1,3	0,9
300	408			1,5	1

2. Типы, помещенные в таблице выше ступенчатой линии, исполняются без приспособления для подъема щеток и для замыкания обмоток ротора на короткое.

Типы, помещенные в таблице ниже ступенчатой линии, исполняются с приспособлением для подъема щеток и для замыкания обмоток ротора на короткое.

3. Электродвигатели с номинальными напряжениями статорной обмотки, напечатанными жирным шрифтом, являются рекомендуемыми; применения двигателей с напряжениями, напечатанными обыкновенным шрифтом, предлагается избегать.

Максимальные моменты, приведенные в таблице, определяются из круговой диаграммы электродвигателя, построенной по данным опытов холостого хода и короткого замыкания и соответствуют номинальному напряжению статора и рабочему соединению его обмоток.

Номинальный момент электродвигателя приближенно определяется из формулы:

$$M = \frac{W}{n_s} = \frac{\text{номинальная мощность в ваттах}}{\text{синхронное число оборотов в минуту}} = \text{kgm.}$$

Таблица III.

Номинальная мощность электродвигателя		Коэффициент полезного действия при номинальной мощности					cos φ при номинальной мощности				
		Синхронное число оборотов в минуту					Синхронное число оборотов в минуту				
kW	л. с. прибл.	3 000	1 500	1 000	750	600	3 000	1 500	1 000	750	600
1,75	2,4	—	—	0,79	—	—	—	—	0,74	—	—
2,85	3,9	—	0,83	0,81	—	—	—	0,82	0,77	—	—
4,5	6,1	—	0,815	0,83	0,83	—	—	0,84	0,79	0,77	—
6,8	9,3	—	0,855	0,855	0,84	—	—	0,85	0,81	0,79	—
10	13,6	—	0,87	0,86	0,85	—	—	0,86	0,83	0,81	—
14,5	19,7	0,88	0,88	0,87	0,86	—	0,89	0,87	0,84	0,83	—
20,5	28	0,89	0,885	0,88	0,87	—	0,9	0,88	0,85	0,84	—
29	39,5	0,9	0,895	0,885	0,88	—	0,9	0,88	0,86	0,85	—
40	54,5	0,905	0,90	0,895	0,89	0,885	0,91	0,89	0,87	0,86	0,83
55	75	0,91	0,91	0,905	0,9	0,895	0,91	0,9	0,88	0,86	0,84
75	102	0,915	0,915	0,91	0,905	0,9	0,91	0,9	0,88	0,87	0,85
100	136	0,92	0,92	0,915	0,91	0,905	0,92	0,9	0,88	0,87	0,85
132	180	0,925	0,925	0,92	0,915	0,915	0,92	0,91	0,89	0,88	0,86
175	239	0,93	0,93	0,925	0,92	0,92	0,92	0,91	0,89	0,88	0,86
230	313	0,935	0,935	0,93	0,925	0,925	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87
300	408	0,935	0,935	0,93	0,93	0,93	0,93	0,91	0,89	0,88	0,87

1. Указанные в таблице коэффициенты полезного действия определяются на основании метода отдельных потерь.

Впредь до утверждения стандарта допусков на коэффициенты полезного действия таковые должны удовлетворять требованиям § 49 п. 5 Правил и норм для испытания электрических машин, одобренных I Всесоюзным энергетическим (IX Электротехническим) съездом.

При исполнении типов электродвигателей, расположенных в таблице ниже ступенчатой линии, по особому заказу, без приспособления для подъема щеток и замыкания обмоток ротора на короткое, указанные в таблице коэффициенты полезного действия уменьшаются.

Для электродвигателей мощн. от	1,75	до	20,5 kW	вкл. на . . .	1,5%
"	"	"	29	" 100 " " " " " "	1%
"	"	"	132	" 300 " " " " " "	0,5%

2. Впредь до утверждения стандарта допусков на коэффициенты мощности ($\cos \varphi$), таковые должны удовлетворять требованиям § 59 п. 6 Правил и норм для испытания электрических машин, одобренных I Всесоюзным энергетическим (IX Электротехническим) съездом.

Германский стандарт (ETZ 1922, стр. 555) предусматривает асинхронные двигатели открытого типа мощностью от 0,125 до 200 kW.

А. Открытые трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Частота:

50 пер./сек.

Рабочие напряжения:

125, 220, 380, 500, 3 000, 5 000 V.

I. Пределы выполнения.

Напряжение до V	Рабочее соединение обмоток	
	звезда от kW	треугольник от kW
125	—	0,125
220	0,125	0,33
380	0,33	1,5
500	3	5,5
3 000	30	—
5 000	80	—

Минимальное значение пускового момента, максимальное значение пускового тока, минимальное значение максимального момента даны как кратные от номинального момента и номинального тока, при номинальном напряжении и рабочем соединении обмоток.

К. п. д. определяются по методу отдельных потерь. Значения к. п. д. и коэффициента мощности даны при выполнении с нормальным воздушным зазором и при напряжении от 220 до 500 V. Для моторов, соединенных в треугольник при 1,5 kW и 380 V, к. п. д. ниже на 1%.

Число об./мин., воздушный промежуток — в тт, коэффициент полезного действия — в % и др.

Номинальная мощность	К. п. д. для числа оборотов							Коэффициент полезности для числа оборотов							Пусковой ток для числа оборотов	Максимальный момент для числа оборотов			Минимальная воздушная промежуток	
	з. с.	3 000	1 500	1 000	750	600	500	3 000	1 500	1 000	750	600	500	3 000—500		3 000—1 000	1 000—500	750—500	3 000—1 500	1 500—500
17	0,125	67	70	67	—	—	—	0,78	0,70	0,66	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,2	0,27	70,5	73	70	65	—	—	0,80	0,73	0,69	0,60	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,33	0,45	74	75	73	68	—	—	0,82	0,76	0,71	0,64	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,5	0,7	76,5	77	75,5	72	—	—	0,84	0,79	0,73	0,67	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,8	1,1	79	80	78	75,5	—	—	0,86	0,80	0,75	0,70	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,1	1,5	80,5	82	80	77,5	—	—	0,87	0,82	0,77	0,72	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	2,0	82	83	81,5	79	—	—	0,88	0,83	0,78	0,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,0	3,0	83,5	84	83	81	—	—	0,89	0,85	0,80	0,76	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,0	4,0	84,5	85	84	82	—	—	0,89	0,86	0,81	0,78	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,5	5,5	85	86	85	83	—	—	0,89	0,87	0,82	0,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7,5	7,5	86	87	86	84	—	—	0,89	0,87	0,84	0,82	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	86,5	87,5	86,5	84,5	—	—	—	0,89	0,87	0,85	0,83	0,81	—	—	—	—	—	—	—	—
15	87	88	87	85,5	84,5	84,5	84,5	0,89	0,87	0,85	0,84	0,82	0,79	—	—	—	—	—	—	—
20	87	88	87	86,5	86	86,5	86,5	0,89	0,87	0,85	0,84	0,83	0,79	—	—	—	—	—	—	—
30	88	88,5	88	87,5	87	87,5	87,5	0,89	0,88	0,86	0,85	0,83	0,79	—	—	—	—	—	—	—
40	89	89,5	89	88,5	88	88,5	88,5	0,90	0,89	0,87	0,86	0,83	0,80	—	—	—	—	—	—	—
55	89,5	90	89,5	89,5	89	89,5	89,5	0,90	0,90	0,89	0,87	0,84	0,81	—	—	—	—	—	—	—
68	90	90,5	90,5	90	89,5	89,5	89,5	0,91	0,90	0,88	0,87	0,85	0,82	—	—	—	—	—	—	—
87	90,5	91	91	90,5	90	90,5	90,5	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,83	—	—	—	—	—	—	—
110	90,5	91	91	91	91	90,5	90,5	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,85	—	—	—	—	—	—	—
132	91	91,5	91,5	91,5	91,5	91	91	0,91	0,90	0,89	0,88	0,86	0,86	—	—	—	—	—	—	—

Расчет электрических машин.

**Республиканская
научно-техническая
библиотека**

В. Открытые трехфазные двигатели с ротором с контактными кольцами.

Частота: 50 пер./сек.

Рабочие напряжения: 125, 220, 380, 500, 3 000, 5 000, 6 000 V.

1. Пределы выполнения.

Напряжение до V	Рабочее соединение обмоток	
	звезда kW	треугольник kW
125	—	0,125 — 100
220	0,125 — 160	0,33 — 160
380	0,33 — 250	3 — 250
500	3 — 250	5,5 — 250
3 000	30	—
5 000	80	—
6 000	125	—

Двигатели, помещенные выше сплошной ступенчатой линии, нормально выполняются без приспособления для короткого замыкания ротора и подъема щеток.

Двигатели, помещенные между сплошной и пунктирной ступенчатыми линиями, могут также выполняться с подъемом щеток. В этом случае величина к. п. д. повышается на 1,5%.

Двигатели, помещенные ниже сплошной ступенчатой линии, нормально выполняются с подъемом щеток. Они могут работать также и с опущенными щетками, и в этом случае к. п. д. понижаются при мощности до 22 kW — на 1,5%, от 30 — 100 kW — на 1,0% и от 125 — 250 kW — на 0,5%. К. п. д. определяются методом отдельных потерь. Значения к. п. д. и коэффициентов мощности даны при выполнении с нормальным воздушным зазором и при напряжении от 220 до 500 V.

Минимальное значение максимального момента дано как кратное от номинального момента, при номинальном напряжении и рабочем соединении обмоток.

Таблицы асинхронных двигателей, выполняемых на заводах Государственного Электротехнического Треста (ГЭТ), а также на заводах SSW даны в конце книги (приложение II и III).

6. Линейная скорость на окружности ротора.

Линейная скорость на окружности ротора выражается формулой

$$v = \frac{\pi \cdot D_r \cdot n_r}{60} \text{ см/сек.} \quad (3)$$

где D_r — диаметр ротора в см,

n_r — число оборотов ротора в минуту.

Так как диаметр ротора D_r лишь незначительно (на величину воздушного промежутка δ) отличается от диаметра статора D и действительная скорость ротора n_r почти равна ¹⁾ синхронной скорости n_s , определяемой по формуле

$$n_s = 60 \frac{f}{p}, \quad (4)$$

то с достаточным приближением можно считать, что

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n_s}{60} \text{ см/сек} \quad (5)$$

¹⁾ Значения n_r и n_s различаются лишь на величину скольжения, которое даже при полной нагрузке достигает значения лишь нескольких процентов.

Число об/мин., воздушный промежуток — в мм, коэффициент полезного действия — в % и др.

Номинальная мощность	К. п. д. для числа оборотов	Коэффициент полезности для числа оборотов						Максимальный момент для числа оборотов		Минимальный полезный про- межуток		
		3 000	1 500	1 000	750	600	500	3 000— 1 000	750— 500	3 000	1 500— 500	1 500— 500
кВт	з. с.											
1,1	1,5	—	—	76	74	—	—	0,71	0,66	0,35	0,3	0,5
1,5	2,0	—	80	78	76	—	—	0,50	0,69	0,35	0,3	0,5
2,2	3,0	81	81	80	78	—	—	0,82	0,76	0,35	0,3	0,5
3,0	4,0	82	82,5	81,5	79,5	—	—	0,86	0,78	0,4	0,35	0,5
4,0	5,5	82,5	84	82,5	80,5	—	—	0,86	0,80	0,4	0,35	0,5
5,5	7,5	82,5	85	83,5	81,5	—	—	0,87	0,84	0,5	0,35	0,5
7,5	10	83,5	85,5	84,5	84	84	—	0,87	0,83	0,5	0,4	0,85
11	15	84,5	86	86,5	85	85	84	0,88	0,86	0,65	0,4	1,0
15	20	85,5	88	87	85,5	86	85,5	0,89	0,87	0,65	0,4	1,0
23	30	88	88,5	88	87,5	87	86,5	0,90	0,86	0,8	0,5	1,25
30	40	89	89,5	89	88,5	88	87,5	0,90	0,87	0,8	0,5	1,25
40	55	89,5	90	89,5	89,5	89	88,5	0,90	0,88	0,8	0,5	1,25
60	80	90	90,5	90,5	90	89,5	89	0,91	0,88	1,0	0,85	1,0
84	110	90,5	91	91	90,5	90	89,5	0,91	0,89	1,0	0,85	1,0
110	140	90,5	91	91	90,5	90,5	90,5	0,91	0,89	1,0	0,85	1,0
136	170	91	91,5	91,5	91,5	91	91	0,91	0,88	1,25	0,8	1,75
160	217	91,5	92	92	91,5	91,5	91,5	0,91	0,89	1,25	0,8	1,75
200	271	92	92,5	92,5	92	92	92	0,92	0,89	1,25	0,8	1,75
240	339	92,5	93	93	92,5	92,5	92,5	0,92	0,89	1,5	1,0	2,0
		93	93,5	93,5	93	93	93	0,92	0,89	1,5	1,0	2,0

2 — 2,5

2 — 2,5 1,6 — 2

Величина диаметра D может быть выражена через полюсное деление τ формулой

$$D = \frac{2 \cdot p \cdot \tau}{\pi} \quad (6)$$

Подставляя в уравнение (5) значения p , и D из (4) и (6), найдем, что

$$v = 2 \cdot f \cdot \tau \text{ cm/sec} \quad (7)$$

или

$$v = \frac{2}{100} \cdot f \cdot \tau \text{ m/sec} \quad (8)$$

Для нормальной частоты $f = 50$

$$v = \tau \text{ m/sec}, \quad (8a)$$

т.е. при частоте $f = 50$ пер./сек., линейная скорость на окружности ротора в метрах в секунду численно равна полюсному делению в сантиметрах.

Чем эта скорость выше, тем дешевле выходит машина. Однако, с точки зрения действия центробежных сил, не следует при нормальных конструкциях идти выше 45 m/sec . Для больших машин наилучшие значения лежат в пределах от 20 до 35 m/sec , а для малых — от 12 до 25 m/sec .

Указанные пределы не относятся к турбомоторам, т.е. быстроходным моторам большой мощности, где, благодаря соответствующему выбору материала, и особенно надежным конструкциям, линейная скорость иногда достигает величины 80—140 m/sec .

7. Линейная нагрузка.

Линейной нагрузкой называется число амперпроводов, приходящееся на 1 пог. см длины окружности статора, равное

$$AS = \frac{2 \cdot m_1 \cdot I_1 \cdot w_1}{\pi \cdot D}, \quad (9)$$

где m_1 — число фаз статора,

I_1 — ток одной фазы статора,

w_1 — число витков обмотки одной фазы статора.

Величина AS оказывает большое влияние на работу машины, на величину намагничивающего тока, на нагревание и т. д. Средние значения для AS дает следующая таблица.

Мощность kW	AS
0,1 — 1	90 — 140
1,1 — 7,5	140 — 200
7,6 — 25	200 — 260
26 — 100	260 — 310
101 — 1 000	310 — 360
свыше 1 000	360 — 400

Эти цифры справедливы для нормальных чисел оборотов, приведенных в гл. I, 2. В тех случаях, когда рассчитываемый двигатель обладает числом оборотов выше или ниже нормального, величину AS берут по мощности, приведенной к нормальным оборотам.

Пример. Рассчитывается мотор мощностью 15 kW при 1 500 об./мин. Для этой мощности нормальным числом оборотов будет 1 000 об./мин. Тогда приведенная мощность будет равна

$$15 \frac{1\,000}{1\,500} = 10 \text{ kW},$$

и для нее находим из таблицы

$$AS = 220.$$

8. Величина магнитной индукции в различных частях машины.

Как общее правило, следует отметить, что в асинхронных машинах индукции (величины силового потока, приходящегося на 1 cm^2 данного сечения) выбираются меньшими, чем в машинах постоянного тока и синхронных, с целью избежать большого намагничивающего тока. Так, в воздушном промежутке асинхронных моторов величина магнитной индукции (для этого случая численно равная напряженности магнитного поля) может быть взята из следующей таблицы.

Мощность kW	B_i
0,1 — 1	4 800 — 5 700
1,1 — 7,5	5 700 — 6 400
7,6 — 25	6 400 — 6 700
26 — 100	6 700 — 6 800
101 — 1 000	~ 7 000
свыше 1 000	~ 7 200

Эти значения также справедливы лишь для нормальных чисел оборотов, и в других случаях здесь также берут B_i по приведенной мощности (см. гл. I, 7).

Что касается индукции в зубцах и теле статора и ротора, то здесь необходимо отметить следующее: так как изменения магнитного потока в роторе происходят значительно медленнее, чем в статоре (частота перемагничивания в роторе равна частоте скольжения, т.е. составляет лишь несколько процентов от частоты перемагничивания в статоре), то с точки зрения потерь в железе (гистерезис и токи Фуко) индукции в роторе могут быть взяты большими, чем в статоре.

Обычно выбирают следующие значения.

	Индукция в зубцах	Индукция в теле
Статор	$B_{z_1} = 14\,000 — 20\,000$	$B_{a_1} = 9\,000 — 13\,000$
Ротор	$B_{z_2} = 14\,500 — 22\,000$	$B_{a_2} = 9\,500 — 13\,500$

Приведенные значения B_{z_1} и B_{z_2} являются максимальными, т.е. соответствуют наименьшему сечению зубца.

9. Плотность тока в проводниках статора и ротора.

С точки зрения потерь на нагревание плотность тока, т.е. число ампер, приходящееся на 1 mm^2 поперечного сечения проводника, не должна быть слишком большой. С другой стороны, слишком малые плотности тока требуют проводников большого сечения, т.е. увеличивают количество меди, а следовательно, повышают

вес и стоимость машины. Плотность тока может быть взята тем большей, чем меньше сечение проводников (так как при этом условия охлаждения улучшаются) и чем лучше вентилируется машина.

Плотность тока в проводниках ротора может быть взята большей, чем для статора, так как в первом случае, благодаря вращению, условия охлаждения выгоднее.

При проектировании можно пользоваться данными следующей таблицы.

Сечение провод- ника в mm^2	Плотность тока в A/mm^2	
	для статора	для ротора
0,5 — 1	4,5 — 4	6,7 — 5,8
1,5 — 4	4 — 3,7	5,8 — 5,1
4 — 10	3,7 — 3,5	5,1 — 4,8
10 — 25	3,5 — 3,3	4,8 — 4,5
25 — 60	3,3 — 3,1	4,5 — 4,4
60 — 120	3,1 — 2,9	4,4 — 4,2

10. Размеры и изоляция проводников статора и ротора.

Для изготовления обмоток применяют электролитическую медь в виде проволок и стержней круглого или (при больших размерах) прямоугольного сечения. Круглое сечение не следует применять при диаметрах свыше 6 mm , так как при этом изготовление обмотки весьма затрудняется. При больших сечениях обмотку устраивают из отдельных стержней или берут две или больше параллельных проволок.

Сечения свыше 200 mm^2 брать не следует, так как при этом получаются слишком большие потери на токи Фуко (поверхностный эффект). Поэтому, если при расчете сечение получается большим, чем 200 mm^2 , нужно устраивать две или несколько параллельных ветвей.

Способ изоляции	Обозначение	Диаметр проволоки d									
		0,3—0,05	0,06—0,1	0,11—0,2	0,22—0,3	0,32—0,5	0,55—0,8	0,85—1,5	1,65—3	3,1—4	4,2—8
		Толщина изоляции $d_1 - d$									
Шелк.											
Однократная обмотка	S	0,035	0,035	0,035	0,04	0,04	0,04	0,04	—	—	—
Двухкратная обмотка	SS	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	—	—	—
Хлопчатобумажная пряжа.											
Однократная обмотка	B	—	—	0,1	0,1	0,12	0,12	0,12	0,15	—	—
Двухкратная обмотка	BB	—	—	0,16	0,16	0,2	0,22	0,22	0,28	0,3	0,4
Однократная обмотка и однократная оплетка	BU	—	—	—	—	—	—	0,55	0,6	0,6	0,6
Двухкратная обмотка и однократная оплетка	BVU	—	—	—	—	—	—	0,7	0,8	0,8	0,9
Бумага и хлопчатобумажная пряжа.											
Оплетка бумагой и однократная обмотка	PB	—	—	—	—	—	—	0,32	0,4	0,45	—
Оплетка бумагой, однократная обмотка и однократная оплетка	PBU	—	—	—	—	—	—	0,6	0,9	0,9	1,0

Изоляция проводников состоит обычно из двухкратной обмотки хлопчатобумажной пряжей; при этом, чем толще проводник, тем толще и изоляция (меньше № нитки). Очень тонкие проводники изолируются иногда шелком.

Для напряжений свыше 500 V, а также для машин, предназначенных работать в сырых помещениях, обмоточные провода, получают поверх обмотки еще оплетку, также из хлопчатобумажной пряжи.

Часто для повышения изолирующей способности проводники перед изолированием хлопчатобумажной пряжей обворачивают и оклеивают бумагой.

Для круглых проводников увеличение диаметра вследствие изолирования, согласно „Норм Союза германских электротехников“, составляет величины, указанные в предыдущей таблице.

Все размеры этой таблицы указаны в *мм*.

Проводники прямоугольного сечения изолируются как указано в приводимой ниже таблице, где учтено то обстоятельство, что увеличение меньшей стороны сечения при узких стержнях несколько больше.

Длина меньшей стороны сечения в <i>мм</i>	С п о с о б и з о л я ц и и							
	ВВ		ВВU		РВ		РВU	
	меньшей стороны	большей стороны	меньшей стороны	большей стороны	меньшей стороны	большей стороны	меньшей стороны	большей стороны
До 1	0,35	0,3	0,85	0,8	0,4	0,35	0,9	0,85
1 — 4	0,45	0,4	0,95	0,9	0,5	0,45	0,95	0,9
4 — 10	0,6	0,6	1,0	1,0	0,6	0,6	1,05	1,05

Для того, чтобы увеличить механическую прочность обмотки и предохранить ее от действия сырости, готовые изолированные катушки пропитывают лаком и высушивают в вакуум-печи, что повышает толщину изоляции всей катушки еще на 10—20%.

Значительное уменьшение толщины изоляции достигается при помощи эмалирования проводников. Такая эмалированная проволока изготавливается диаметром от 0,03 до 2 *мм*, при чем толщина изоляции составляет величины, указанные в приведенной ниже таблице, соответствующей „Нормам Союза германских электротехников“.

Диаметр проволоки в <i>мм</i>	Толщина изоляции $d_1 - d$ в <i>мм</i>
0,03 — 0,05	0,012
0,06 — 0,1	0,015
0,11 — 0,2	0,02
0,22 — 0,3	0,025
0,32 — 0,4	0,03
0,42 — 0,5	0,035
0,55 — 0,7	0,04
0,75 — 1,0	0,05
1,05 — 2,0	0,06

Эмалированная проволока в виду малого сечения применяется лишь для обмотки самых малых двигателей (для швейных машин, полировальных станков, вентиляторов, ручных сверлилок и т. д.).

Что касается размеров самих проводников, то для проволоки круглого сечения „Нормы союза германских электротехников“ дают следующую таблицу.

Диаметр в <i>mm</i>	Допускаемое отклонение в <i>mm</i>	Поперечное сечение в <i>mm</i> ²	Диаметр в <i>mm</i>	Допускаемое отклонение в <i>mm</i>	Поперечное сечение в <i>mm</i> ²
0,05	± 0,003	0,00196	1,25	± 0,018	1,2272
0,06		0,00283	1,30		1,327
0,07		0,00385	1,35		1,431
0,08		0,00503	1,40		1,539
0,09	± 0,004	0,00636	1,45	± 0,020	1,651
0,10		0,00725	1,50		1,767
0,11		0,00950	1,55		1,887
0,12		0,01131	1,60		2,011
0,13	± 0,005	0,01327	1,65	± 0,025	2,138
0,14		0,01539	1,70		2,270
0,15		0,01767	1,75		2,405
0,16		0,02011	1,8		2,545
0,18		0,02545	1,9		2,885
0,20		0,03142	2,0		3,142
0,22		0,03801	2,1		3,464
0,25		0,04909	2,2		3,801
0,28		0,06158	2,3	± 0,03	4,155
0,30		0,07069	2,4		4,524
0,32	± 0,007	0,08042	2,5		4,909
0,35		0,09627	2,6		5,309
0,38		0,1134	2,7		5,728
0,40		0,1257	2,8		6,157
0,42	± 0,009	0,1385	2,9		6,605
0,45		0,1590	3,0		7,069
0,48		0,1810	3,1	± 0,04	7,548
0,50		0,1964	3,2		8,042
0,55		0,2376	3,3		8,553
0,60		0,2827	3,4		9,079
0,65		0,3318	3,5		9,621
0,70		0,3848	3,6		10,179
0,75		0,4418	3,8		11,341
0,80		0,5027	4,0		12,566
0,85	± 0,012	0,5675	4,2	± 0,05	13,854
0,90		0,6362	4,5		15,904
0,95		0,7088	4,8		18,096
1,0		0,7854	5,0		19,635
1,05	± 0,016	0,8659	5,2	± 0,06	21,237
1,10		0,9503	5,5		23,758
1,15		1,0387	5,8		26,481
1,20		1,1310	6,0		28,274

Для проводников прямоугольного сечения нормальными можно считать следующие размеры.

Размеры сечения в мм	Площадь сечения в мм ²	Размеры сечения в мм	Площадь сечения в мм ²	Размеры сечения в мм	Площадь сечения в мм ²	Размеры сечения в мм	Площадь сечения в мм ²
1 × 10	10	2 × 16	32	7 × 20	140	2 × 30	60
1,5 × 10	15	3 × 16	48	8 × 20	160	3 × 30	90
2 × 10	20	4 × 16	64	9 × 20	180	4 × 30	120
3 × 10	30	5 × 16	80	10 × 20	200	5 × 30	150
4 × 10	40	6 × 16	96	1 × 25	25	6 × 30	180
5 × 10	50	7 × 16	112	2 × 25	50	7 × 30	210
1 × 12,5	12,5	8 × 16	128	3 × 25	75	2 × 40	80
2 × 12,5	25	1 × 20	20	4 × 25	100	3 × 40	120
3 × 12,5	37,5	2 × 20	40	5 × 25	125	4 × 40	160
4 × 12,5	50	3 × 20	60	6 × 25	150	5 × 40	200
5 × 12,5	62,5	4 × 20	80	7 × 25	175	2 × 50	100
6 × 12,5	75	5 × 20	100	8 × 25	200	3 × 50	150
1 × 16	16	6 × 20	120	1 × 30	30	4 × 50	200

Размеры сечения в мм	Площадь сечения в мм ²	Размеры сечения в мм	Площадь сечения в мм ²	Размеры сечения в мм	Площадь сечения в мм ²	Размеры сечения в мм	Площадь сечения в мм ²
3 × 3	9	6 × 6	36	8 × 8	64	9 × 15	135
3 × 4	12	6 × 7	42	8 × 9	72	9 × 16	144
3 × 5	15	6 × 8	48	8 × 10	80	9 × 17	153
3 × 6	18	6 × 9	54	8 × 11	88	9 × 18	162
4 × 4	16	6 × 10	60	8 × 12	96	10 × 10	100
4 × 5	20	6 × 11	66	8 × 13	104	10 × 11	110
4 × 6	24	6 × 12	72	8 × 14	112	10 × 12	120
4 × 7	28	7 × 7	49	8 × 15	120	10 × 13	130
4 × 8	32	7 × 8	56	8 × 16	128	10 × 14	140
5 × 5	25	7 × 9	63	9 × 9	81	10 × 15	150
5 × 6	30	7 × 10	70	9 × 10	90	10 × 16	160
5 × 7	35	7 × 11	77	9 × 11	99	10 × 17	170
5 × 8	40	7 × 12	84	9 × 12	108	10 × 18	180
5 × 9	45	7 × 13	91	9 × 13	117	10 × 19	190
5 × 10	50	7 × 14	98	9 × 14	126	10 × 20	200

Для СССР Отделом стандартов и нормалей Всесоюзного электротехнического объединения (ВЭО) выработан проект стандарта на обмоточную медь, согласно которому устанавливается следующая классификация (марки) по роду изоляции:

Марка ПЭ — изоляция эмалевая.

Марка ПЭБО — изоляция эмалевая и один слой хлопчатобумажной обмотки.

Марка ПЭБД — изоляция эмалевая и два слоя хлопчатобумажной обмотки.

Марка ПЭШО — изоляция эмалевая и один слой шелковой обмотки.

Марка ПЭШД — изоляция эмалевая и два слоя шелковой обмотки.

Марка ПШО — изоляция с одним слоем шелковой обмотки.

Марка ПШД — изоляция с двумя слоями шелковой обмотки.

Марка ПБО — изоляция с одним слоем хлопчатобумажной обмотки.

Марка ПБД — изоляция с двумя слоями хлопчатобумажной обмотки.

Марка ПБТ — изоляция с тремя слоями хлопчатобумажной обмотки.

Марка ПБОО — изоляция с одним слоем хлопчатобумажной обмотки и хлопчатобумажной оплеткой.

Марка ПБДО — изоляция с двумя слоями хлопчатобумажной обмотки и хлопчатобумажной оплеткой.

Марка ПББО — изоляция с двумя слоями обмотки из кабельной бумаги и одним слоем хлопчатобумажной обмотки.

Марка ПББД — изоляция с двумя слоями обмотки из кабельной бумаги и двумя слоями хлопчатобумажной обмотки.

По геометрической форме сечения обмоточная медь разделяется на круглую и прямоугольную.

Края прямоугольной обмоточной меди должны быть закруглены радиусом, величина которого зависит от величины меньшей стороны сечения a :

при $a < 1,81 \text{ мм}$ — края должны быть закруглены настолько чтобы не было острых граней,

при $2,1 < a < 5,1 \text{ мм}$ — радиус закругления $\approx 0,5 \text{ мм}$,

при $a > 5,1 \text{ мм}$ — радиус закругления $\approx 1,0 \text{ мм}$.

Геометрические размеры, допуски и веса круглой обмоточной меди.

Диаметр мм	Допуск $\pm \text{мм}$	Сечение мм^2	Вес 1 кило- метра кг	Диаметр мм	Допуск $\pm \text{мм}$	Сечение мм^2	Вес 1 кило- метра кг	Диаметр мм	Допуск $\pm \text{мм}$	Сечение мм^2	Вес 1 кило- метра кг
0,03		0,00071	0,0063	0,38		0,11341	1,011	2,26		4,0115	35,753
0,04		0,00126	0,0120	0,41		0,13202	1,177	2,44		4,6759	41,675
0,05		0,00196	0,0175	0,44		0,15205	1,355	2,63	$\pm 0,03$	3,4325	48,418
0,06		0,00283	0,0252	0,47		0,17349	1,546	2,83		6,2902	56,062
0,07		0,00385	0,0343	0,51	$\pm 0,01$	0,20428	1,821				
0,08		0,00502	0,0448	0,55		0,23758	2,118	3,05		7,3062	65,117
0,09		0,00636	0,0567	0,59		0,27349	2,437	3,28	$\pm 0,04$	8,4496	75,309
0,10		0,00785	0,070	0,64		0,32170	2,877	3,53		9,7868	87,226
0,11		0,00950	0,085	0,69		0,37393	3,383	3,80		11,341	101,08
0,12		0,01131	0,101								
0,13	$\pm 0,005$	0,01327	0,118	0,74		0,43008	3,833	4,10		13,202	117,67
0,14		0,01539	0,137	0,80		0,50265	4,480	4,40	$\pm 0,05$	15,205	135,52
0,15		0,01767	0,158	0,86	$\pm 0,015$	0,58088	5,177	4,70		17,349	154,63
0,16		0,02011	0,179	0,93		0,67929	6,054				
0,17		0,02270	0,202	1,00		0,78540	7,000	5,10		20,428	182,07
0,18		0,02545	0,227					5,50	$\pm 0,06$	23,758	211,75
0,19		0,02835	0,253	1,08		0,9161	8,165	5,90		27,840	243,67
0,20		0,03142	0,280	1,16		1,0568	9,419				
0,21		0,03464	0,309	1,25		1,2272	10,937	6,40		32,170	286,72
0,23		0,04155	0,370	1,35	$\pm 0,02$	1,4314	12,757	6,90	$\pm 0,06$	37,393	333,27
0,25		0,04909	0,437	1,45		1,6513	14,717	7,40		43,008	383,32
				1,56		1,9113	17,035	8,00		50,265	448,00
0,27		0,05726	0,510	1,68		2,2167	19,757				
0,29		0,06605	0,589					8,60		58,088	517,72
0,31	$\pm 0,01$	0,07548	0,673	1,81		2,5730	22,933	9,30	$\pm 0,1$	67,926	605,43
0,33		0,08553	0,762	1,95	$\pm 0,025$	2,9865	26,617	10,00		78,540	700,00
0,35		0,09621	0,857	2,10		3,4636	30,570				

В двух таблицах указаны толщины изоляции для круглой и прямо угольной обмоточной меди и в этих же таблицах даны допуски на толщину изоляции. Следует отметить, что в таблицах указана полная толщина изоляции (двух-сторонняя).

Все имеющие место в двигателе потери переходят в теплоту и вызывают нагревание соответствующих частей. Так как чрезмерное нагревание может вызвать

Геометрические размеры, допуски и веса прямоугольной обмоточной меди для сечений от 5,1 до 19,5 мм².

Размеры		Допуски		Сечение мм²	Вес 1 километра кг	Размеры		Допуски		Сечение мм²	Вес 1 километра кг
Меньшая сторона сечения <i>a</i> мм	Большая сторона сечения <i>b</i> мм	δ_a ± мм	δ_b ± мм			Меньшая сторона сечения <i>a</i> мм	Большая сторона сечения <i>b</i> мм	δ_a ± мм	δ_b ± мм		
1,0	5,1	0,02	0,07	5,1	45,4	2,83	3,8	0,04	0,05	10,8	96,3
1,16	4,4	0,02	0,05	5,1	45,4	1,0	12,5	0,02	0,09	12,5	111,2
1,35	3,8	0,03	0,05	5,1	45,4	1,16	10,8	0,02	0,09	12,5	111,2
1,56	3,28	0,03	0,05	5,1	45,4	1,35	9,3	0,03	0,07	12,5	111,2
1,0	5,9	0,02	0,07	5,9	52,5	1,56	8,0	0,03	0,07	12,5	111,2
1,16	5,1	0,02	0,07	5,9	52,5	1,81	6,9	0,03	0,07	12,5	111,2
1,35	4,4	0,03	0,05	5,9	52,5	2,1	5,9	0,04	0,07	12,5	111,2
1,56	3,8	0,03	0,05	5,9	52,5	2,44	5,1	0,04	0,07	12,5	111,2
1,81	3,28	0,03	0,05	5,9	52,5	2,83	4,4	0,04	0,05	12,5	111,2
1,0	6,9	0,02	0,07	6,9	61,4	3,28	3,8	0,05	0,05	12,5	111,2
1,16	5,9	0,02	0,07	6,9	61,4	1,0	14,5	0,02	0,09	14,5	129,1
1,35	5,1	0,03	0,07	6,9	61,4	1,16	12,5	0,02	0,09	14,5	129,1
1,56	4,4	0,03	0,05	6,9	61,4	1,35	10,8	0,03	0,09	14,5	129,1
1,81	3,8	0,03	0,05	6,9	61,4	1,56	9,3	0,03	0,07	14,5	129,1
2,1	3,28	0,04	0,05	6,9	61,4	1,81	8,0	0,03	0,07	14,5	129,1
1,0	8,0	0,02	0,07	8,0	71,4	2,1	6,9	0,04	0,07	14,5	129,1
1,16	6,9	0,02	0,07	8,0	71,4	2,44	5,9	0,04	0,07	14,5	129,1
1,35	5,9	0,03	0,07	8,0	71,4	2,83	5,1	0,04	0,07	14,5	129,1
1,56	5,1	0,03	0,07	8,0	71,4	3,28	4,4	0,05	0,05	14,5	129,1
1,81	4,4	0,03	0,05	8,0	71,4	1,16	14,5	0,02	0,09	16,8	149,7
2,1	3,8	0,04	0,05	8,0	71,4	1,35	12,5	0,03	0,09	16,8	149,7
2,44	3,28	0,04	0,05	8,0	71,4	1,56	10,8	0,03	0,09	16,8	149,7
1,0	9,3	0,02	0,07	9,3	82,9	1,81	9,3	0,03	0,07	16,8	149,7
1,16	8,0	0,02	0,07	9,3	82,9	2,1	8,0	0,04	0,07	16,8	149,7
1,35	6,9	0,03	0,07	9,3	82,9	2,44	6,9	0,04	0,07	16,8	149,7
1,56	5,9	0,03	0,07	9,3	82,9	2,83	5,9	0,04	0,07	16,8	149,7
1,81	5,1	0,03	0,07	9,3	82,9	3,28	5,1	0,05	0,07	16,8	149,7
2,1	4,4	0,04	0,05	9,3	82,9	3,8	4,4	0,05	0,05	16,8	149,7
2,44	3,8	0,04	0,05	9,3	82,9	1,16	16,8	0,02	0,12	19,5	173,8
2,83	3,28	0,04	0,05	9,3	82,9	1,35	14,5	0,03	0,09	19,5	173,8
1,0	10,8	0,02	0,09	10,8	96,3	1,56	12,5	0,03	0,09	19,5	173,8
1,16	9,3	0,02	0,07	10,8	96,3	1,81	10,8	0,03	0,09	19,5	173,8
1,35	8,0	0,03	0,07	10,8	96,3	2,1	9,3	0,04	0,07	19,5	173,8
1,56	6,9	0,03	0,07	10,8	96,3	2,44	8,0	0,04	0,07	19,5	173,8
1,81	5,9	0,03	0,07	10,8	96,3	2,83	6,9	0,04	0,07	19,5	173,8
2,1	5,1	0,04	0,07	10,8	96,3	3,28	5,9	0,05	0,07	19,5	173,8
2,44	4,4	0,04	0,05	10,8	96,3	3,8	5,1	0,05	0,07	19,5	173,8

разрушение изоляции обмоток и сделать двигатель непригодным к дальнейшей работе, то установлены пределы температуры, превышение которых не допускается.

Различаются следующие режимы работы двигателей: а) продолжительная нагрузка; б) кратковременная нагрузка; в) повторно-кратковременная нагрузка.

а) Продолжительная работа.

Продолжительной работой машины называется такая работа, при которой рабочий период настолько велик, что нагрев машины достигает своего установившегося состояния. Номинальной мощностью машины при продолжительной работе называется та мощность, которую машина может отдавать в течение произвольного долгого времени. При этом конечная температура и конечные превышения температуры отдельных частей машины не должны превосходить указанных ниже пределов.

Геометрические размеры, допуски и веса прямоугольной обмоточной меди для сечений от 22,6 до 74 мм².

Размеры		Допуски		Сечение мм²	Вес 1 кило- метра кг	Размеры		Допуски		Сечение мм²	Вес 1 кило- метра кг
Меньшая сторона сечения <i>a</i> мм	Большая сторона сечения <i>b</i> мм	δ_a ± мм	δ_b ± мм			Меньшая сторона сечения <i>a</i> мм	Большая сторона сечения <i>b</i> мм	δ_a ± мм	δ_b ± мм		
1,35	16,8	0,03	0,12	22,6	201,5	3,8	10,8	0,05	0,09	41,0	365,6
1,56	14,5	0,03	0,09	22,6	201,5	4,4	9,3	0,05	0,07	41,0	365,6
1,81	12,5	0,03	0,09	22,6	201,5	5,1	8,0	0,07	0,07	41,0	365,6
2,1	10,8	0,04	0,09	22,6	201,5	5,9	6,9	0,07	0,07	41,0	365,6
2,44	9,3	0,04	0,07	22,6	201,5	1,81	26,3	0,03	0,15	47,0	419,2
2,83	8,0	0,04	0,07	22,6	201,5	2,1	22,6	0,04	0,15	47,0	419,2
3,28	6,9	0,05	0,07	22,6	201,5	2,44	19,5	0,04	0,12	47,0	419,2
3,8	5,9	0,05	0,07	22,6	201,5	2,83	16,8	0,04	0,12	47,0	419,2
4,4	5,1	0,05	0,07	22,6	201,5	3,28	14,5	0,05	0,09	47,0	419,2
1,35	19,5	0,03	0,12	26,3	234,2	8,8	12,5	0,05	0,09	47,0	419,2
1,56	16,8	0,03	0,12	26,3	234,2	4,4	10,8	0,05	0,09	47,0	419,2
1,81	14,5	0,03	0,09	26,3	234,2	5,1	9,3	0,07	0,07	47,0	419,2
2,1	12,5	0,04	0,09	26,3	234,2	5,9	8,0	0,07	0,07	47,0	419,2
2,44	10,8	0,04	0,09	26,3	234,2	2,1	26,3	0,04	0,15	55,0	490,2
2,83	9,3	0,04	0,07	26,3	234,2	2,44	22,6	0,04	0,15	55,0	490,2
3,28	8,0	0,05	0,07	26,3	234,2	2,83	19,5	0,04	0,12	55,0	490,2
3,8	6,9	0,05	0,07	26,3	234,2	3,28	16,8	0,05	0,12	55,0	490,2
4,4	5,9	0,05	0,07	26,3	234,2	3,8	14,5	0,05	0,09	55,0	490,2
1,56	19,5	0,03	0,12	30,5	272,3	4,4	12,5	0,05	0,09	55,0	490,2
1,81	16,8	0,03	0,12	30,5	272,3	5,1	10,8	0,07	0,09	55,0	490,2
2,1	14,5	0,04	0,09	30,5	272,3	5,9	9,3	0,07	0,07	55,0	490,2
2,44	12,5	0,04	0,09	30,5	272,3	6,9	8,0	0,07	0,07	55,0	490,2
2,83	10,8	0,04	0,09	30,5	272,3	2,1	30,5	0,04	0,20	64,0	570,5
3,28	9,3	0,05	0,07	30,5	272,3	2,44	26,3	0,04	0,15	64,0	570,5
3,8	8,0	0,05	0,07	30,5	272,3	2,83	22,6	0,04	0,15	64,0	570,5
4,4	6,9	0,05	0,07	30,5	272,3	3,28	19,5	0,05	0,12	64,0	570,5
5,1	5,9	0,07	0,07	30,5	272,3	3,8	16,8	0,05	0,12	64,0	570,5
1,56	22,6	0,03	0,15	35,3	314,7	4,4	14,5	0,05	0,09	64,0	570,5
1,81	19,5	0,03	0,12	35,3	314,7	5,1	12,5	0,07	0,09	64,0	570,5
2,1	16,8	0,04	0,12	35,3	314,4	5,9	10,8	0,07	0,09	64,0	570,5
2,44	14,5	0,04	0,09	35,3	314,7	6,9	9,3	0,07	0,07	64,0	570,5
2,83	12,5	0,04	0,09	35,3	314,7	2,44	30,5	0,04	0,20	74,0	659,9
3,28	10,8	0,05	0,09	35,3	314,7	2,83	26,3	0,04	0,15	74,0	659,9
3,8	9,3	0,05	0,07	35,3	314,7	3,28	22,6	0,05	0,15	74,0	659,9
4,4	8,0	0,05	0,07	35,3	314,7	3,8	19,5	0,05	0,12	74,0	659,9
5,1	6,9	0,07	0,07	35,3	314,7	4,4	16,8	0,05	0,12	74,0	659,9
1,81	22,6	0,03	0,15	41,0	365,6	5,1	14,5	0,07	0,09	74,0	659,9
2,1	19,5	0,04	0,12	41,0	365,6	5,9	12,5	0,07	0,09	74,0	659,9
2,44	16,8	0,04	0,12	41,0	365,6	6,9	10,8	0,07	0,09	74,0	659,9
2,83	14,5	0,04	0,09	41,0	365,9	8,0	9,3	0,07	0,07	74,0	659,9
3,28	12,5	0,05	0,09	41,0	365,9						

Если на щитке машины при указании мощности не сделано особого добавления, то под номинальной мощностью машины понимается мощность при продолжительной работе.

б) Кратковременная работа.

Кратковременной работой машины называется такая работа, в течение которой нагрев машины не достигает установившегося состояния, а перерыв в работе машины достаточно велик для того, чтобы при возобновлении работы температура машины не отличалась от температуры охлаждающей среды. Номинальной мощностью

Геометрические размеры, допуски и веса прямоугольной обмоточной меди для сечений от 86,0 до 1250,0 мм².

Размеры		Допуски		Сечение мм ²	Вес 1 километра кг	Размеры		Допуски		Сечение мм ²	Вес 1 километра кг
Меньшая сторона сечения <i>a</i> мм	Большая сторона сечения <i>b</i> мм	δ_a ± мм	δ_b ± мм			Меньшая сторона сечения <i>a</i> мм	Большая сторона сечения <i>b</i> мм	δ_a ± мм	δ_b ± мм		
2,83	30,5	0,04	0,20	86,0	764,5	4,4	30,5	0,05	0,20	135,0	1 200
3,28	26,3	0,05	0,15	86,0	764,5	5,1	26,3	0,07	0,15	135,0	1 200
3,8	22,6	0,05	0,15	86,0	764,5	3,8	41,0	0,05	0,25	156,0	1 390
4,4	19,5	0,05	0,12	86,0	764,5	5,1	30,5	0,07	0,20	156,0	1 390
5,1	16,8	0,07	0,12	86,0	764,5	5,9	30,5	0,07	0,20	181,0	1 613
5,9	14,5	0,07	0,09	86,0	764,5	4,4	47,0	0,05	0,25	210,0	1 871
6,9	12,5	0,07	0,09	86,0	764,5	5,9	35,3	0,07	0,20	210,0	1 871
8,0	10,8	0,07	0,09	86,0	764,5	5,1	55,0	0,07	0,25	283,0	2 523
3,28	30,5	0,05	0,20	100,0	889,0	6,9	41,0	0,07	0,25	283,0	2 523
3,8	26,3	0,05	0,15	100,0	889,0	5,9	64,0	0,07	0,30	380,0	3 384
4,4	22,6	0,05	0,15	100,0	889,0	8,0	47,0	0,07	0,25	380,0	3 384
5,1	19,5	0,07	0,12	100,0	889,0	6,9	74,0	0,07	0,30	510,0	4 547
8,0	12,5	0,07	0,09	100,0	889,0	9,3	55,0	0,07	0,25	510,0	4 547
9,3	10,8	0,07	0,09	100,0	889,0	8,0	86,0	0,07	0,40	690,0	6 150
3,28	35,3	0,05	0,20	116,0	1033	10,8	64,0	0,09	0,30	690,0	6 150
3,8	30,5	0,05	0,20	116,0	1033	9,3	100,0	0,07	0,40	930,0	8 290
4,4	26,3	0,05	0,15	116,0	1033	12,5	74,0	0,09	0,30	930,0	8 290
5,1	22,6	0,07	0,15	116,0	1033	10,8	116,0	0,09	0,50	1250,0	11 140
9,3	12,5	0,07	0,09	116,0	1033	14,5	86,0	0,09	0,40	1250,0	11 140

машины при кратковременной работе называется та мощность, которую машина может отдавать в течение определенного, указанного на ее щитке времени. При этом конечные температуры и конечные превышения температуры отдельных частей машины не должны превосходить указанных ниже пределов.

Нормальные периоды работы устанавливаются в 5, 10, 15, 30, 60 и 120 минут.

Номинальная мощность машин, предназначенных для кратковременной работы, должна указываться на щитке машины с дополнительной надписью „в течение . . . минут“.

с) Повторно-кратковременная работа.

Повторно-кратковременной работой называется такая работа, при которой рабочие периоды регулярно чередуются с периодами остановки или работы без нагрузки — „промежутками“ (например, двигатели для кранов, подъемных машин и т. п.) Общая продолжительность одного рабочего периода с одним „промежутком“ не должна превосходить 10 минут.

Режим повторно-кратковременной работы характеризуется относительной продолжительностью рабочего периода, под каковой понимается отношение времени рабочего периода к суммарной продолжительности рабочего периода и „промежутка“.

Нормальными значениями относительной продолжительности рабочего периода считаются 15, 25, 40%.

Номинальной мощностью машины при повторно-кратковременной работе называется мощность, при которой машина работает длительно при регулярном чередовании рабочих периодов с „промежутками“ при заданной относительной продолжительности рабочего периода. При этом конечные температуры и конечные превышения температуры не должны превосходить указанных ниже пределов.

Толщина изоляции прямоугольной обмоточной меди.

Марка	Меньшая сторона сечения <i>mm</i>											
	1,0		1,16 — 1,81		2,1 — 2,83		3,28 — 5,9		6,9 — 8		9,3	
	Толщина изоляции <i>mm</i>	Допуск $\pm$ <i>mm</i>	Толщина изоляции <i>mm</i>	Допуск $\pm$ <i>mm</i>	Толщина изоляции <i>mm</i>	Допуск $\pm$ <i>mm</i>	Толщина изоляции <i>mm</i>	Допуск $\pm$ <i>mm</i>	Толщина изоляции <i>mm</i>	Допуск $\pm$ <i>mm</i>	Толщина изоляции <i>mm</i>	Допуск $\pm$ <i>mm</i>
ПБО	0,11	0,01	0,11	0,01	0,16	0,015	0,16	0,015	0,21	0,02	0,21	0,02
ПБД	0,20	0,02	0,20	0,02	0,25	0,03	0,30	0,03	0,40	0,04	0,40	0,04
ПБТ	0,30	0,03	0,30	0,03	0,40	0,04	0,45	0,05	0,60	0,06	0,60	0,06
ПББО	0,50	0,06	0,50	0,06	0,50	0,06	0,50	0,06	0,60	0,06	0,60	0,06
ПББД	0,50	0,08	0,50	0,06	0,60	0,06	0,60	0,07	0,60	0,07	0,60	0,07

По проекту Общесоюзного стандарта медная эмалированная проволока должна иметь следующие размеры.

Номинальный диаметр <i>d</i> (диаметр голой проволоки) <i>mm</i>	Диаметр изолированной проволоки <i>d</i> ₁ <i>mm</i>	Сечение меди <i>mm</i> ²	Номинальный диаметр <i>d</i> (диаметр голой проволоки) <i>mm</i>	Диаметр изолированной проволоки <i>d</i> ₁ <i>mm</i>	Сечение меди <i>mm</i> ²
0,05	0,060	0,00196	0,33	0,360	0,08553
0,06	0,070	0,00283	0,35	0,380	0,09821
0,07	0,080	0,00385	0,38	0,410	0,11341
0,08	0,090	0,00503	0,41	0,455	0,13202
0,09	0,100	0,00636	0,44	0,475	0,15205
0,10	0,110	0,00785	0,47	0,505	0,17349
0,11	0,125	0,00950	0,51	0,550	0,20428
0,12	0,135	0,01131	0,55	0,590	0,23758
0,13	0,145	0,01327	0,59	0,630	0,27340
0,14	0,155	0,01539	0,64	0,680	0,32170
0,15	0,165	0,01767	0,69	0,730	0,37393
0,16	0,175	0,02011	0,74	0,790	0,43008
0,17	0,185	0,02270	0,80	0,850	0,50285
0,18	0,195	0,02545	0,86	0,910	0,58088
0,19	0,205	0,02835	0,93	0,980	0,67929
0,20	0,215	0,03142	1,00	1,050	0,78500
0,21	0,230	0,03464	1,08	1,128	0,9161
0,23	0,250	0,04155	1,16	1,216	1,0568
0,25	0,270	0,04909	1,25	1,308	1,2272
0,27	0,295	0,05726	1,35	1,406	1,4314
0,29	0,315	0,06605	1,45	1,506	1,6513
0,31	0,340	0,07548	1,50	1,556	1,7671

Номинальная мощность машины для повторно-кратковременной работы должна указываться на щитке машины с дополнительной надписью „при повторно-кратковременной работе“ и указанием относительной продолжительности рабочего периода.

Примечание. При заказе машины должно быть оговорено, должна ли машина во время перерывов совсем выключаться или работать вхолостую.

Приведем теперь нормы повышения температуры, одобренные IX ВЭС.

Классификация изолирующих материалов

1. Все изолирующие материалы, применяемые в электрических машинах, в отношении допускаемых для них наибольших температур нагрева, разделяются на следующие четыре класса:

Допуски.

Для голой меди		Для изоляции	
Диаметр d мм		Толщина изоляции $d_1 - d$ мм	Допуск мм
от	до		
0,05	0,09	0,010	± 0,005
0,10	0,20	0,015	
0,21	0,25	0,020	
0,27	0,29	0,025	
0,31	0,38	0,030	± 0,007
0,41	0,47	0,035	
0,51	0,69	0,040	
0,74	1,00	0,050	± 0,01
1,08	1,50	0,056	

Класс 0 — непропитанные и погруженные в масло волокнистые материалы, как-то: хлопчатобумажная пряжа и ткань, натуральный шелк, бумага и т. п. органические вещества.

Класс А — пропитанные или погруженные в масло волокнистые материалы, как-то: хлопчатобумажная пряжа и ткань, натуральный шелк, бумага и т. п. органические вещества, также эмаль, служащая для покрытия проводников.

Класс В — препараты из слюды, асбеста и т. п. материалов минерального происхождения со связующими веществами.

Если совместно с изоляционным материалом класса В, с целью крепления применяется в небольшом количестве материал класса А, то подобная комбинированная изоляция может быть отнесена к классу В в том случае, если электрические и механические свойства обмотки с этой изоляцией не ухудшаются из-за действия более высокой температуры, допускаемой для материалов класса В (здесь под словом „ухудшение“ следует понимать, что не будут иметь места никакие изменения, которые могут сделать изоляцию непригодной для длительной работы).

Класс С — слюда без связывающих материалов, фарфор, стекло, кварц и другие подобные материалы.

Примечание. Хлопчатобумажная, бумажная и шелковая изоляция считается пропитанной, если пропитывающее вещество вытесняет собою воздух между отдельными волокнами, при чем это вещество не должно обязательно заполнять собою промежутков между изолированными проводниками. Пропитывающее вещество должно обладать хорошими изолирующими свойствами, должно в совершенстве обволакивать волокна, способствовать плотному взаимному сцеплению волокон как между собой, так и с телом проводника; это вещество не должно образовывать пустых пространств внутри изоляции проводника как вследствие своего испарения, так и по каким-либо другим причинам. Оно не должно разжижаться под влиянием допустимых предельных температур. Наконец оно должно быть теплостойким.

2. Если применяется комбинированная изоляция из материалов, принадлежащих к различным классам, за исключением случаев, указанных в классе В (см. пункт 1). Превышение температуры каждого из примененных материалов не должно превосходить предельного значения, допускаемого для данного материала.

Примечание. а) Если для изоляции различных частей обмотки (как-то: утопленных во впадинах и лобовых) применены разные материалы, то предельная допустимая температура для каждой из частей обмотки определяется примененной для этой части изоляцией.

б) Если изоляция, примененная для какой-либо части, состоит из чередующихся слоев изолирующих материалов разных классов (например, чередующихся слоев материала класса А и класса В, то предельной допустимой для такой части температурой является та, которая соответствует материалу с наименьшей предельной температурой.

Нагрев частей машины как при продолжительной, так и при повторно-кратковременной работе характеризуется разностью температур, именуемой „превышением температуры“, между температурой частей нагретой машины и температурой охлаждающей среды, при кратковременной же работе — разностью температур частей машины в конце и начале работы.

Наибольшие превышения температуры частей машины не должны превосходить указанных ниже пределов.

Нормы превышения температуры отдельных частей машины устанавливаются по „наибольшей наблюдаемой температуре“ и стандартной температуре охлаждающей среды.

Стандартная температура охлаждающей среды устанавливается в 35° С для воздуха и в 25° С для воды.

Наибольшие наблюдаемые температуры и наибольшие превышения температуры частей машин не должны превосходить значений, указанных в нижеследующей таблице.

Нормы таблицы принимают, что высота местности над уровнем моря не превосходит 1 000 м.

Для машин, предназначенных для установки на больших высотах и в помещениях, имеющих температуру выше 35° С, должны быть особые условия заказа.

Далее приводим таблицу наибольших наблюдаемых температур и наибольших повышений температуры частей машины.

№ п/п	Класс изоляции	Наименование части машины или род обмотки	Наибольшая наблюдаемая температура °С	Наибольшее превышение температуры °С
1	Класс 0	Все обмотки на вращающихся и неподвижных частях машины за исключением п. п. 5, 6, 7 . . .	80	45
2	Класс А	То же	95	60
3	Класс В	То же	115	80
4	Класс С	То же	Ограничены таким нагревом, при котором температура соседних частей, а также превышение температуры не происходят указанных для них пределов.	
5	Классы 0, А, В	Изолированные, постоянно замкнутые накоротко обмотки . . .	На 5° выше, чем в п. 1, 2, 3.	
6	Без изоляции	Постоянно замкнутые накоротко обмотки . . .	Как в п. 4.	
7	Все классы	Однорядные обмотки возбуждения с голой неизолированной поверхностью . . .	На 5° выше, чем в п. 1, 2, 3.	
8	—	Железо, не соприкасающееся с обмотками	Как в п. 4.	
9	—	Железо с уложенными в нем обмотками	Как в п. 1, 2, 3, 4.	
10	—	Коллекторы и контактные кольца	95	60
11	—	Подшипники	80	45
12	—	Все другие части	Как в п. 4.	

Приведем еще германские нормы нагревания (§ 39 REM 1923, см. стр. 34).

№ по порядку	Изоляция	Часть машины	Пределная температура в °С	Предел нагревания в °С
1	Класс I Непропитанная волокнистая изоляция	Обмотки статора переменного тока, уложенные в пазах	75	40
2		Все другие обмотки, за исключением указанных в 9 и 10	85	50
3	Класс II Пропитанная волокнистая изоляция	Обмотки статора переменного тока, уложенные в пазах	85	50
4		Все другие обмотки, за исключением указанных в 9 и 10	95	60
5	Класс III Волокнистая изоляция в изолирующей массе	Все обмотки, за исключением указанных в 9 и 10	95	60
6	Класс IV Изоляция лаком	Все обмотки, за исключением указанных в 9 и 10	105	70
7	Класс V Препараты слюды и асбеста	Все обмотки, за исключением указанных в 9 и 10	115	80
8	Класс VI Чистая слюда, фарфор и огнеупорные вещества	Все обмотки, за исключением указанных в 9 и 10	Ограничивается только влиянием на соседние изолирующие части	
9	Изоляция класса I — VI	Однорядные голые обмотки индуктора с прокладкой из бумаги	100	65
10		Длительно замыкаемые накопотно обмотки	На 5° выше, чем в 1 до 7	
11	Без изоляции	Длительно замыкаемые накопотно обмотки	Ограничивается только влиянием на соседние изолирующие части	
12	—	Железные сердечники без утопленных обмоток		
13	—	Железные сердечники с утопленными обмотками	Как в 1 до 7	
14	—	Коллектор и контактные кольца	95	60
15	—	Подшипники	80	45
16	—	Все другие части	Ограничивается только влиянием на соседние изолирующие части	

12. Выбор типа двигателя.

Как известно из теории электрических машин, существуют два основных типа асинхронных электродвигателей:

- 1) с короткозамкнутым ротором,
- 2) с ротором, снабженным контактными кольцами.

Моторы первого типа отличаются простотой конструкции, большой компактностью и меньшей стоимостью, но, наряду с этим, они обладают рядом существенных недостатков, из которых главнейшими являются:

1. Большой пусковой ток. При присоединении такого мотора к полному напряжению сети короткозамкнутый ротор действует точно так же, как и короткозамкнутая вторичная обмотка трансформатора, и поэтому в обмотке статора проходит сильный ток. Таким образом, допускается пускать в ход только небольшие моторы. При больших двигателях с короткозамкнутым ротором, для избежания чрезмерного возрастания силы тока, в обмотку статора включают сопротивление или понижают напряжение при помощи автотрансформатора. При этом часть рабочего напряжения поглощается, от чего уменьшается величина вращающегося поля, в связи с чем уменьшается и пусковой ток двигателя.

2. Малый начальный вращающий момент. Необходимость ограничивать величину статорного пускового тока обуславливает уменьшение начального вращающего момента, который для двигателей, пускаемых под нагрузкой, обычно должен лежать в пределах от 2 до 3 раз больше нормального момента. Между тем, уже при желании достигнуть начального вращающего момента, равного нормальному, приходится считать с тем, что при этом пусковой ток будет в 3—4 раза больше нормального. При таком потреблении тока не только весьма сильно возрастают все потери напряжения в сети, но, благодаря получающемуся противодействию генератора (в крупных моторных установках), это ведет к нежелательным колебаниям напряжения в сети. Поэтому моторы с короткозамкнутым ротором пригодны только в тех случаях, когда они пускаются с малой нагрузкой или когда мощность их настолько мала, что колебания напряжения не могут отразиться на работе питающей сети.

Увеличения начального вращающего момента можно, как известно, добиться еще увеличением сопротивления ротора, но этот способ ведет к увеличению омических потерь и, следовательно, к уменьшению к. п. д., а потому допустим лишь в тех случаях, когда величина к. п. д. не имеет значения, когда, например, двигатель работает лишь короткое время.

3. Невозможность регулирования числа оборотов. Обладая постоянным сопротивлением в цепи ротора, эти моторы тем самым не допускают регулирования числа оборотов.

Моторы с контактными кольцами имеют пусковое сопротивление, которое с помощью тех же колец включается в цепь ротора. Благодаря этому имеется полная возможность регулировать потребление тока при пуске. Одновременно с этим обмотка статора может быть присоединена к полному напряжению сети, благодаря чему величина вращающегося поля достигает максимального значения. Для достижения начального вращающего момента, равного нормальному, требуется сила тока немногим большая нормальной; при двойном начальном моменте — немногим большая двойной нормальной силы тока.

Кроме того, здесь имеется возможность в некоторых пределах регулировать число оборотов мотора путем включения реостата в цепь ротора, т. е. изменения сопротивления ротора. Происходящие при этом явления те же, что и при регулировке моторов постоянного тока помощью сопротивления в цепи якоря: с уменьшением числа оборотов падает соответственно мощность двигателя, сила же тяги остается постоянной. Поэтому моторы с контактными кольцами пригодны для пуска в ход под нагрузкой и при необходимости регулирования скорости. Следует, однако,

оговориться, что такой способ регулирования числа оборотов не экономичен, так как энергия теряемая в реостате целиком переходит в теплоту, не производя механической работы, т. е. другими словами к. п. д. двигателя при этом значительно уменьшается.

Существует еще много типов асинхронных двигателей ¹⁾, дающих возможность получить небольшой пусковой ток и значительный вращающий момент без применения реостата в цепи ротора. Из этих методов пуска можно упомянуть метод противосоединения в роторе. Метод этот, предложенный первоначально Arnold'ом, заключается в том, что отдельные фазы роторной обмотки разделяются на несколько частей, при чем эти отдельные части в момент пуска в ход соединяются между собою так, что наводимые в них вращающимся магнитным полем ЭДС частично друг друга компенсируют, так что результирующая ЭДС равна их разности. При обычных же условиях работы, благодаря переключениям, которые могут совершаться автоматически, противосоединение нарушается, так что двигатель работает нормально.

Görges упростил в значительной мере способ Arnold'a, но не смог устранить двух существенных недостатков: относительно низкого коэффициента мощности при пуске и относительно высокого пускового тока.

В недавнее время проф. К. И. Шенфер дал несколько новых пусковых схем обмоток ротора, в которых устранены вышеуказанные недостатки ²⁾.

Можно упомянуть также получившие в последнее время широкое распространение конструкции короткозамкнутых двигателей с вихретоковыми роторами и с роторами, имеющими глубокие впадины. Действие этих двигателей основано на явлении skin-effect'a, проявляющемся в увеличении сопротивления ротора в момент пуска, благодаря чему пусковой ток остается в допустимых пределах и пусковой момент не испытывает уменьшения ³⁾.

Г Л А В А II.

Расчет статора и ротора.

1. Нахождение основных размеров машины.

Основными размерами, определяющими как весь ход дальнейшего расчета, так и степень конструктивного совершенства проектируемой машины, в смысле использования материала, а следовательно, и экономичности, являются длина и диаметр выточки статора.

Подводимая к статору кажущаяся мощность в kVA

$$P_s = \frac{P}{\eta \cdot \cos \varphi} \quad \text{kVA} \dots \dots \dots (11)$$

где P — полезная мощность двигателя в kW,
 η — коэффициент полезного действия,
 $\cos \varphi$ — коэффициент мощности.
 С другой стороны,

$$P_s = m_1 \cdot E_1 \cdot I_1 \cdot 10^{-3} \quad \text{kVA}, \dots \dots \dots (12)$$

где m_1 — число фаз обмотки статора,
 E_1 — напряжение, подводимое к одной фазе статора,
 I_1 — сила тока одной фазы статора.

¹⁾ См. Arnold E. — Die Wechselstromtechnik. т. V, ч. I, стр. 249, 262, 265; журналы A. E. G. Mitteilungen, Siemens-Zeitschrift и др.

²⁾ См. „Электричество“, 1924 г. № 2, Шенфер К. И. — Новый метод безреостатного пуска в ход асинхронных двигателей.

³⁾ См. Lwischitz M. — Käfigankernmotoren mit durch Stromverdichtung verbesserten Anlaufverhältnissen, Siemens Zeitschrift, 1928, № 4.

С достаточным приближением, вместо E_1 , может быть взята наводимая в одной фазе статора ЭДС E_1' , которая при синусоидальном напряжении будет равна

$$E_1' = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot w_1 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \quad \text{В} \quad (13)$$

где f — частота сети,

w_1 — число витков одной фазы статора,

f_1 — обмоточный коэффициент, который может быть предварительно принят равным для трехфазных двигателей $f_1 = 0,96$ и для однофазных двигателей $f_1 = 0,83$; точное значение f_1 может быть найдено лишь после выбора обмотки (см. § 2 этой главы),

Φ — магнитный поток на пару полюсов.

Так как

$$f = \frac{pn_s}{60}, \quad (14)$$

то

$$E_1' = \pi \sqrt{2} \cdot \frac{pn_s}{60} \cdot w_1 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \quad (15)$$

где n_s — синхронное число оборотов.

Магнитный поток можно выразить в форме

$$\Phi = B_{\text{ср}} \cdot l_t \cdot \tau \quad (16)$$

где $B_{\text{ср}}$ — средняя магнитная индукция в воздушном промежутке,

l_t — теоретическая длина статора,

τ — полюсное деление.

Так как при расчете машины мы задаемся не средней, а максимальной индукцией B_p , то можно написать, что

$$B_{\text{ср}} = \alpha_t \cdot B_p \quad (17)$$

где коэффициент α_t зависит от формы поля и для синусоидального распределения индукции равен $\frac{2}{\pi}$. Принимая предварительно эту величину ¹⁾, а также полагая

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (18)$$

где D — диаметр выточки статора в см и $2p$ — число полюсов, получим

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot B_t \cdot l_t \cdot \frac{\pi D}{2p} = \frac{B_t \cdot l_t \cdot D}{p} \quad (19)$$

Из уравнения (9) имеем

$$I_1 = \frac{AS \cdot \pi \cdot D}{2 \cdot m_1 \cdot w_1} \quad (20)$$

Подставляя найденные значения для E_1' , Φ , I_1 в уравнение (12), получим

$$\begin{aligned} P_s \cdot m_1 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{pn_s}{60} \cdot w_1 \cdot f_1 \cdot \frac{B_t \cdot l_t \cdot D}{p} \cdot \frac{AS \cdot \pi \cdot D}{2 \cdot m_1 \cdot w_1} 10^{-8} 10^{-8} = \\ = n_s \cdot B_t \cdot l_t \cdot D^2 \cdot AS \cdot \frac{\pi^2 \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot 10^{-11}}{60 \cdot 2} = \\ = 1,161 \cdot 10^{-12} \cdot n_s \cdot B_t \cdot f_1 \cdot l_t \cdot D^2 \cdot AS \quad (21) \end{aligned}$$

¹⁾ В гл. III будет показано, как определяется истинное значение α_t .

Это выражение можно переписать в виде

$$P_s = (1,161 \cdot AS \cdot B_l \cdot 10^{-12}) \cdot D^2 \cdot l_l \cdot n_s \cdot f_1 = C \cdot D^2 \cdot l_l \cdot n_s \cdot f_1, \dots (22)$$

где

$$C = 1,161 \cdot AS \cdot B_l \cdot 10^{-12} \dots \dots \dots (23)$$

называется коэффициентом использования.

Из (22) можно написать

$$C = \frac{P_s}{D^2 \cdot l_l \cdot n_s \cdot f_1} \dots \dots \dots (24)$$

Из этой формулы видно, что чем больше будет коэффициент использования C , тем меньшими могут быть взяты при той же мощности и том же числе оборотов размеры D и l_l . Как видно из уравнения (23), величина C зависит от выбора AS и B_l . Индукция в воздухе B_l тесно связана с насыщением зубцов, которое не может быть взято произвольно большим.

От значения AS сильно зависит нагревание машины.

Подставляя в (24) уравнение (11), найдем, что

$$C = \frac{P}{D^2 \cdot l_l \cdot n_s \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot f_1} \dots \dots \dots (25)$$

Таким образом, зная P и n_s , а также задавшись значениями AS , B_l , η , $\cos \varphi$ и f_1 , наиболее подходящими к данному случаю (см. гл. 1, 3, 4, 7, 8), мы сможем подсчитать C и, следовательно, найти произведение $D^2 \cdot l_l$. Далее лучше всего составить табличку для различных D и l_l (так чтобы $D^2 \cdot l_l = \text{const}$ вроде приведенной ниже.

D см							
l_l см							
v м/сек							
τ см							
$l_l : D$							

При окончательном установлении D и l_l нужно считаться с тем, чтобы линейная скорость ротора по возможности не превосходила значений, указанных в гл. I; далее, можно указать, что величина отношения

$$l_l : D$$

для небольших двигателей берется приблизительно равной 1, при средних мощностях выбирают обычно

$$l_l : D = 0,5 - 0,9,$$

чтобы свести до минимума вес машины и, наконец, для больших тихоходных моторов берут

$$l_l : D = 0,1 - 0,4.$$

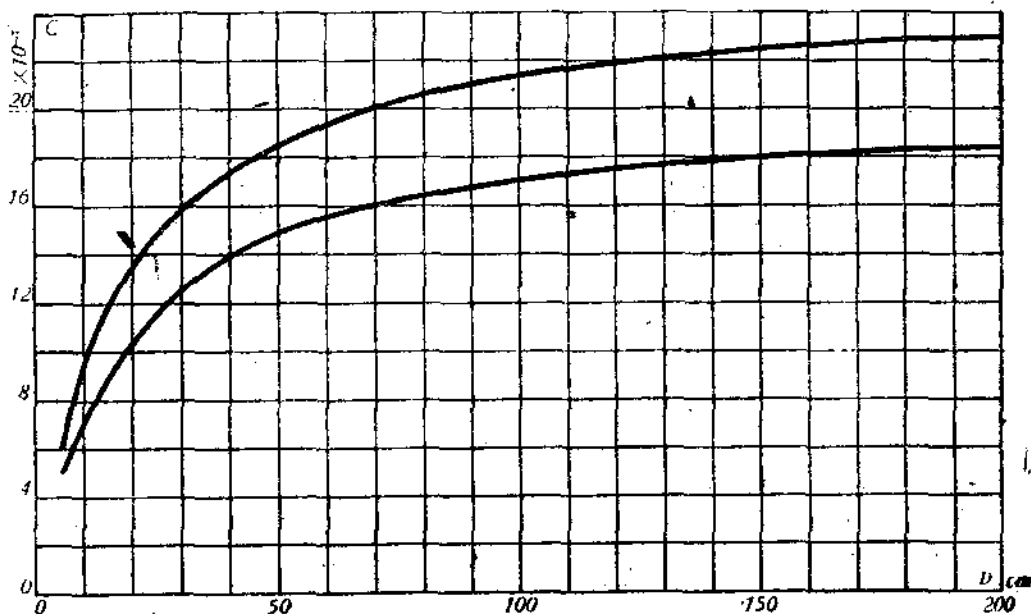
Следует еще отметить, что у больших моторов величина l_l редко превосходит 30—40 см.

Для контроля найденных значений можно также пользоваться кривыми фиг. 1, на которой значения C нанесены в зависимости от D (для данного D величина C лежит между двумя кривыми, при чем, чем меньше число оборотов, тем ближе к нижней кривой).

Из фиг. 1 мы видим, что для малых машин C растет приблизительно пропорционально D , а затем возрастание C замедляется. Эти кривые построены по данным, взятым из обмеров многих современных машин, и могут также служить известным критерием при нахождении основных размеров двигателя.

Однако, приведенные значения соответствуют лишь средним скоростям и при очень тихоходных или, наоборот, быстроходных машинах могут получиться большие расхождения между уравнением (23) и кривыми фиг. 1.

Для быстрого подсчета величин D и l_i чрезвычайно удобными являются графики, построенные Rummel'ем¹⁾ и приведенные на фиг. 2 (для мощностей до 10 kW) и фиг. 3 (для мощностей до 250 kW). Пользоваться этими графиками нужно следующим образом.



Фиг. 1.

На фиг. 2 по оси абсцисс нанесены диаметры D , а по оси ординат — величины l_i . Кроме того, имеется ряд лучей для различных величин отношения

$$\lambda = \frac{l_i}{D}$$

и ряд кривых — для различных мощностей.

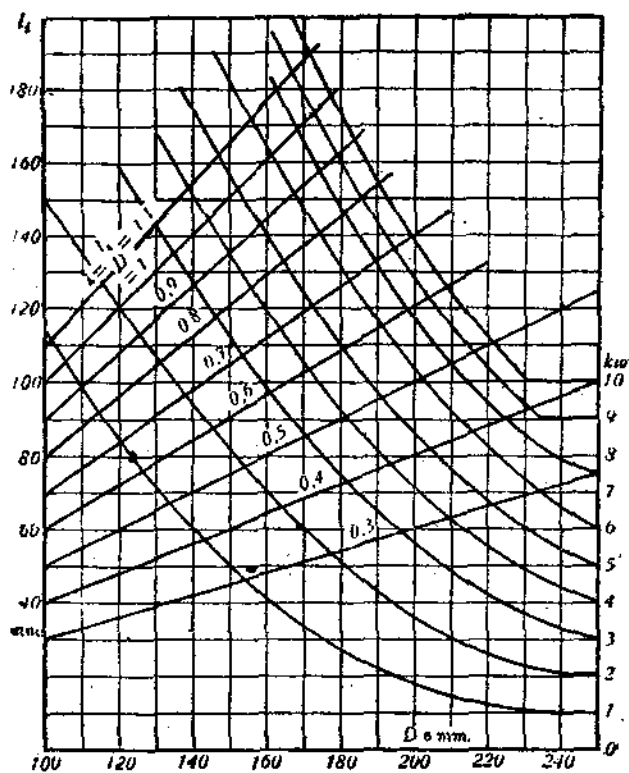
Задавшись величиной λ , мы находим на диаграмме точку пересечения соответствующего луча λ с соответствующей кривой мощности и сразу определяем D и l_i .

Кривые фиг. 2 соответствуют числу оборотов $n_s = 1500$ об./мин. При других числах оборотов, определение D и l_i нужно производить по приведенной мощности (см. гл. I, 6).

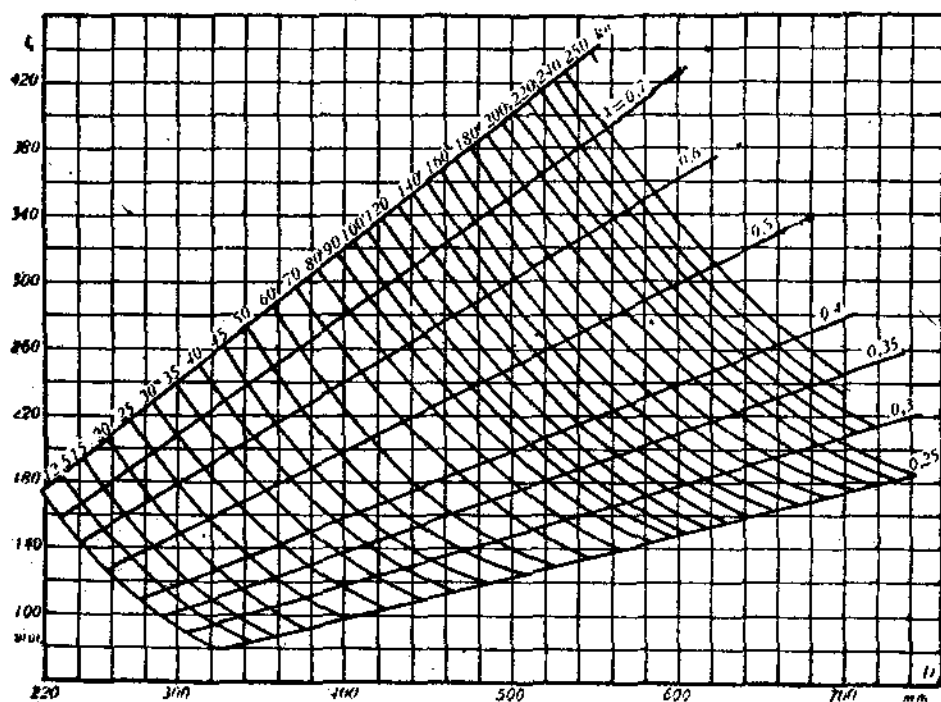
Определение D и l_i для мощностей от 10 до 250 kW производится аналогичным путем по фиг. 3, которая вычерчена в предположении, что $n_s = 1000$ об./мин. И здесь, при других числах оборотов, нужно пользоваться приведенной мощностью.

При проектировании серии однотипных моторов различной мощности (обычный способ заводского проектирования) для всех двигателей берут один и тот же диаметр D и изменяют лишь длину l_i . Так можно поступать, вообще говоря, если вся

¹⁾ E. Rummel. — Die Asynchronmotoren und ihre Berechnung. Berlin. 1926.



Фиг. 2.



Фиг. 3.

серия имеет одно и то же число оборотов. Практически, однако, можно брать одинаковые диаметры и для двигателей с рядом стоящими числами полюсов (например, для 6- и 8-полюсных моторов); нельзя только брать одинаковые диаметры для 4- и 2-полюсных моторов, так как при этом в последних индукция в теле статора и ротора будет вдвое больше, чем при $2p = 4$.

При проектировании серий, для мотора наибольшей мощности берут обычно $\lambda = \frac{l}{D} \approx 1$, чтобы как можно лучше использовать станину.

При изготовлении однофазных двигателей берут такой же статор, как и у трехфазного двигателя, но заполняют лишь $\frac{2}{3}$ всех впадин. Заполнение всех впадин невыгодно, так как увеличение ЭДС всего на 13,5% вызывает увеличение расхода меди на 50%. Присутствие незаполненных впадин не только не мешает, но даже является желательным, так как уменьшает индуктивность обмотки и, кроме того, удешевляет изготовление штампованных железных листов для тела статора. Часто, кроме того, в этих впадинах помещают так называемую вспомогательную фазу, служащую для пуска в ход однофазных моторов.

При таком устройстве и при одинаковых геометрических размерах мощности трехфазного и однофазного двигателя относятся приблизительно как

$$P_{III} : P_I \approx 1,6 : 1.$$

Поэтому при желании воспользоваться для расчета однофазного двигателя ранее приведенными данными для AS и B_1 их следует выбирать такими, как для трехфазного двигателя с мощностью

$$P_{III} \approx 1,6 P_I.$$

Таким же точно образом можно пользоваться и кривыми фиг. 2 и 3.

Коэффициент использования однофазного двигателя при тех же размерах, также будет равен

$$C_I \approx 0,6 C_{III}$$

что необходимо учитывать при контроле найденных размеров с помощью фиг. 1.

Относительно определения основных размеров аномальных конструкций асинхронных двигателей (совершенно закрытые двигатели и двигатели, предназначенные для прерывистой работы) будет сказано ниже, в гл. VIII.

2. Обмотки асинхронных моторов.

В качестве обмоток для асинхронных двигателей применяются: обмотки переменного тока (катушечные и стержневые), обмотки постоянного тока и (специально для роторов) короткозамкнутые обмотки.

А. Статорные обмотки.

1. ОБМОТКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Проволочные катушечные обмотки применяются, главным образом, в тех случаях, когда требуется большое число витков при сравнительно малых сечениях проводника (например, для высоковольтных моторов малой и средней мощности).

При больших силах тока устраивают или стержневые катушечные или чаще обходные обмотки, а при очень больших силах тока берут, кроме того, несколько параллельных ветвей.

Катушечные обмотки устраиваются большей частью в виде однослойных, т. е. в каждой впадине лежит лишь одна катушечная сторона, состоящая из нескольких проводников. Расстояние между серединами двух сторон одной и той же катушки равно полюсному делению. Если сторона катушки расположена лишь в одной впадине,

т.е. мы имеем лишь одну впадину на полюс и фазу, то необходимая ЭДС достигается при наименьшем числе витков, ибо все провода, составляющие сторону катушки, в каждый момент занимают одно и то же пространственное положение (их ЭДС имеет одну и ту же фазу). Однако, при таком устройстве поверхность железа будет весьма мало использована и, кроме того, в кривой ЭДС появятся большие высшие гармонические, искажающие ее форму. Поэтому в современных машинах никогда не ограничиваются одной впадиной на полюс и фазу ($q = 1$), а распределяют сторону катушки в нескольких впадинах или берут $q < 1$ (обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу).

Для статоров асинхронных двигателей обычно берут: $q_1 = 2 \div 8$. Однако, довольно часто, особенно в моторах высокого напряжения, из-за экономии в изоляционном материале и удобства расположения торцовых соединений, q приходится сокращать и брать в статоре 8 — 4 впадины на полюс и фазу.

При наличии лишь одной впадины на полюс и фазу, ЭДС отдельных проводников, как мы уже говорили, достигают одинаковых по величине и направлению значений в один и тот же момент, и поэтому суммарная ЭДС фазы будет равна алгебраической сумме ЭДС отдельных проводников.

Если имеется несколько (q) впадин на полюс и фазу, то ЭДС, наводимые в двух смежных пазах, сдвинуты в своих фазах на угол $\frac{\pi}{mq}$ и суммарная ЭДС фазы имеет меньшее значение, чем при $q = 1$. В этом случае приходится брать уже не алгебраическую, а геометрическую сумму ЭДС отдельных проводников. Если вычертить векторы ЭДС, наводимых в проводах смежных пазов на протяжении 2π и, притом, так, чтобы к концу одного вектора было приложено начало следующего, то получится правильный многоугольник с $2mq$ сторонами (фиг. 4).

Мерой использования обмотки служит обмоточный коэффициент, равный отношению суммарной ЭДС (геометрической суммы) к алгебраической сумме отдельных ЭДС. Из чертежа

$$f_1 = \frac{AD}{AB + BC + CD}$$

$$AD = 2 \cdot AL = 2 \cdot AO \cdot \sin\left(\frac{1}{2} q \cdot \frac{\pi}{mq}\right)$$

$$AB = BC = \dots = 2 \cdot AM = 2 \cdot AO \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{mq}\right),$$

откуда

$$f_1 = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2mq}}$$

Отсюда для трехфазных обмоток:

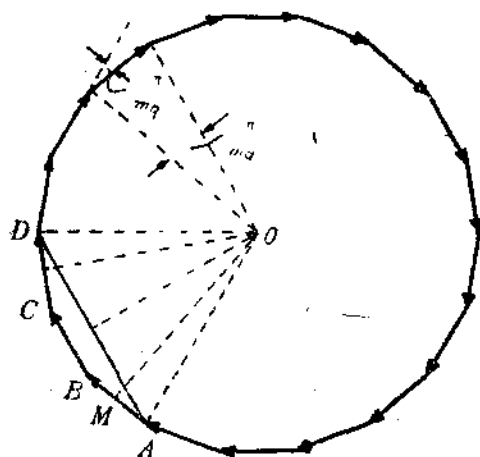
$q =$	(1)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	∞
$f_1 =$	(1)	0,966	0,960	0,958	0,957	0,956	0,956	0,956	0,956	0,955	0,955

Для однофазных обмоток (при заполнении $\frac{2}{3}$ всех впадин, см. гл. II, 1).

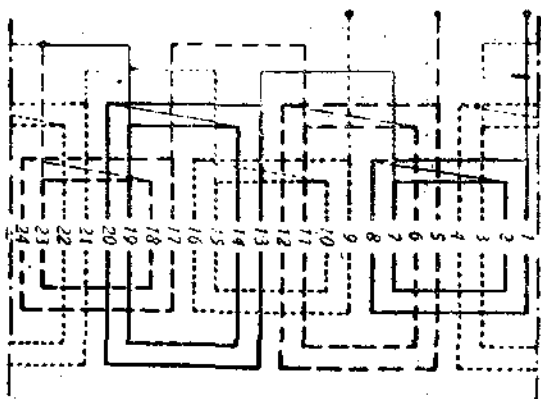
$Q =$	3	6	9	12	15	∞
$q =$	2	4	6	8	10	∞
$f_1 =$	0,866	0,837	0,831	0,829	0,828	0,478

Здесь q представляет действительное число впадин (заполненное рабочей обмоткой) на полюс, а Q — полное число впадин на полюс.

В трехфазных машинах заполняются все впадины, при чем расстояние между сторонами катушек, принадлежащих к различным фазам, равно 120° электрическим градусам, или $\frac{2}{3}$ полюсного деления. При изготовлении однофазных обмоток их накладывают на такой же статор, как и у трехфазного двигателя, но заполняют лишь $\frac{2}{3}$ всех впадин. Заметим, кстати, что для однофазных машин чаще всего берут $Q = 6, 9$ или 12 и соответственно $q = 4, 6$ или 8 впадин на полюс.



Фиг. 4.



Фиг. 5.

Если число использованных впадин назовем через u' , а число всех впадин через u , то число впадин на полюс и фазу будет

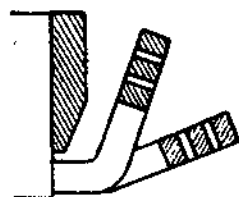
$$q = \frac{u'}{2pt} \dots \dots \dots (27)$$

равное

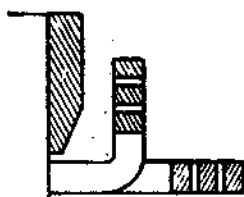
$$q = \frac{u}{8p} \text{ — для трехфазной обмотки} \dots \dots \dots (27')$$

и

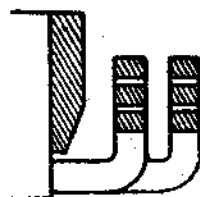
$$q = \frac{u}{3p} \text{ — для однофазной обмотки} \dots \dots \dots (27'')$$



Фиг. 6а.



Фиг. 6б.

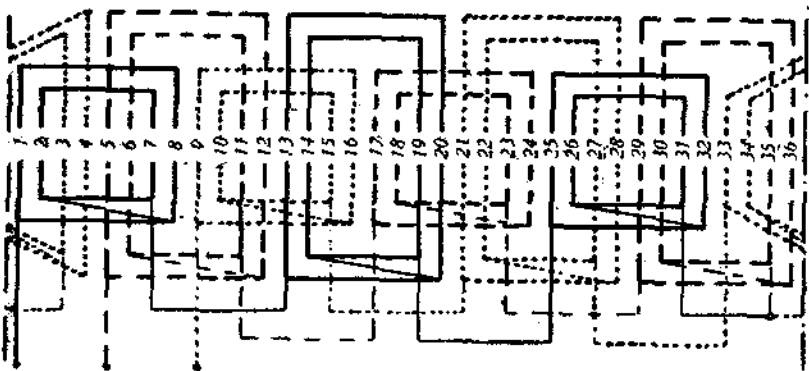


Фиг. 6с.

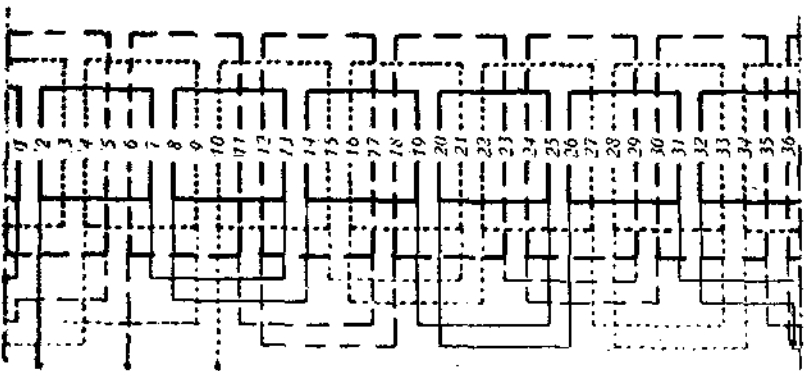
а) Катушечные обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу.

Наиболее распространенной обмоткой для статоров асинхронных двигателей является катушечная обмотка с лобовыми соединениями, расположенными в двух плоскостях (двухэтажная обмотка). Схема такой обмотки изображена на фиг. 5, а расположение лобовых соединений (головок обмотки) — на фиг. 6а, 6б и 6с. Отдельные фазы обмотки на фиг. 5 обозначены различной штриховкой. Число впадин на полюс и фазу здесь $q = 2$ и $2p = 4$. Каждая линия представляет собой

совокупность нескольких проводников, заложенных в один паз. Тонкими линиями обозначены соединения отдельных катушек. Отдельные фазы соединены в звезду. Обмотка содержит $3p$ катушечных групп, состоящих каждая из q катушек. Мы имеем здесь две формы катушечных групп — малую и большую, которые, вообще говоря, обладают различными индуктивностями и сопротивлениями. Однако, при четном числе пар полюсов все фазы имеют в целом одинаковые индуктивности и сопротивления, так как большие и малые катушки распределены по фазам равномерно. При нечетном числе пар полюсов общее число катушечных групп ($= 3p$) также будет нечетным; мы будем иметь $\frac{3p-1}{2}$ малых групп, столько же больших и одну средней формы, лобовые соединения которой для возможности перехода из



Фиг. 7.



Фиг. 8.

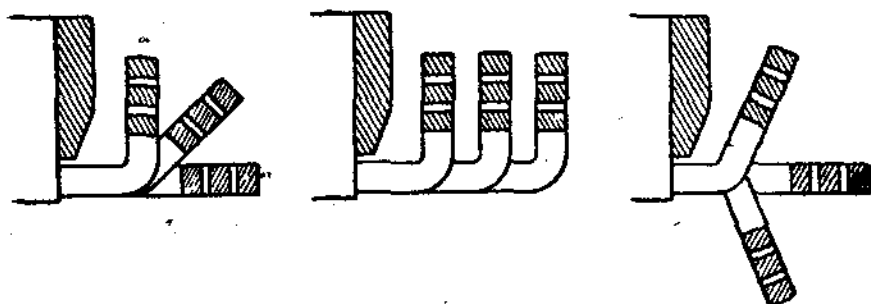
одной плоскости в другую изогнуты, как показано на фиг. 7 ($2p = 6$, $q = 2$). В этом случае индуктивности всех трех фаз уже не будут одинаковы, хотя различие будет сравнительно небольшой.

Чтобы избежать неравенства катушек при нечетном числе пар полюсов, можно расположить лобовые соединения в трех плоскостях (трехэтажная обмотка), как показано на фиг. 8 ($2p = 6$, $q = 2$). Здесь, однако, различие в сопротивлениях и индуктивностях отдельных фаз проявится довольно резко, так как каждая фаза содержит катушки различных размеров.

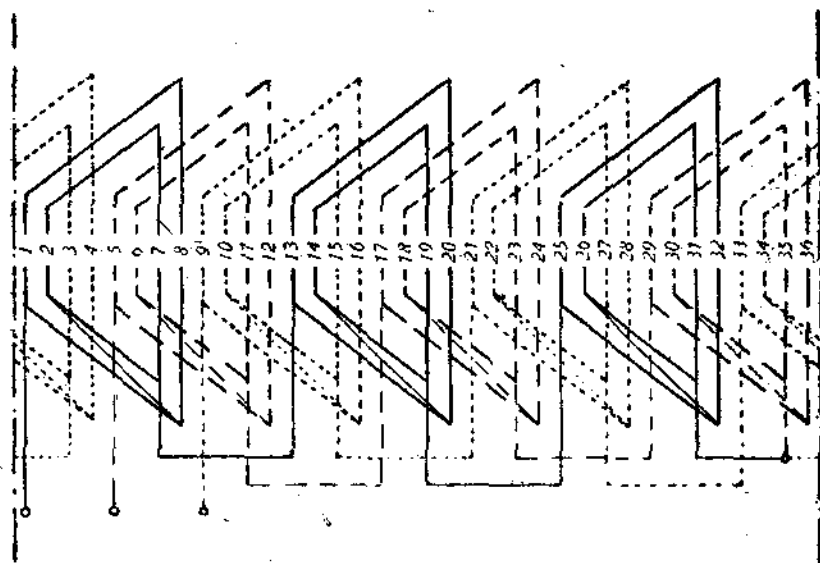
Расположение лобовых соединений трехэтажных обмоток показано на фиг. 9.

Можно, однако, выполнить обмотку при нечетном числе пар полюсов и с совершенно одинаковыми сопротивлениями и индуктивностями отдельных фаз.

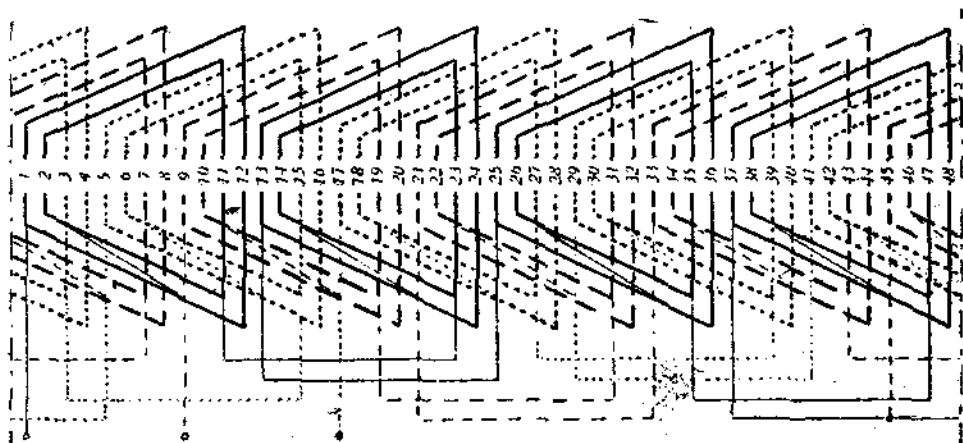
При этом лобовые соединения уже не остаются прямолинейными, а будут изогнуты (так называемые „витые“ соединения).



Фиг. 9.



Фиг. 10.



Фиг. 11.

Если каждое лобовое соединение перекрывает лишь одну соседнюю катушку, то мы получим обмотку по фиг. 10 ($2p = 6, q = 2$). При перекрывании каждым лобовым соединением двух соседних катушек обмотка имеет вид, показанный на фиг. 11 ($2p = 4, q = 4$). Катушки этих „витых“ обмоток имеют форму трапеции.

Статоры асинхронных двигателей средней и большой мощности делаются обычно составными, при чем плоскость раздела совпадает с валом машины. Статор состоит, таким образом, из двух половин ¹⁾, из которых верхняя должна иметь возможность подниматься не нарушая целостности обмоточных катушек. Для этой цели лобовые соединения должны быть расположены так, чтобы не перекрывать места раздела. Схема такой обмотки представлена на фиг. 12, ($2p = 4, q = 2$). Здесь, благодаря различию в величине катушек, резко может проявиться неравенство сопротивлений и индуктивностей фаз, которое может быть устранено лишь в том случае, если $\frac{2p}{3}$ равно целому числу.

Путем пересоединения лобовых соединений в обмотках, изображенных на фиг. 5, 8 и 12, легко получить обмотки, катушки которых имеют одинаковую ширину и форму. Из обмотки фиг. 5 мы получаем тогда обмотку по фиг. 13, с катушками одинаковой ширины, равной полюсному делению. Обмотка по фиг. 8 переходит в обмотку фиг. 14, где ширина каждой катушки равна $\frac{5}{6}$ полюсного деления, и, наконец, из обмотки по фиг. 12 мы получаем обмотку фиг. 15 с шириной катушки, равной полюсному делению. Обмотки, изображенные на фиг. 13, 14 и 15 вполне симметричны.

В американской практике большинство обмоток с катушками одинаковой ширины (обмотки изображены на фиг. 13, 14 и 15) в большинстве случаев выполняются в виде двухслойных ²⁾. Примером такой конструкции может служить фиг. 16. Лобовые соединения этих обмоток имеют такую же форму, как и у однослойных. Лобовые соединения обмоток по фиг. 10, 11, 13, 14, 15 и 17 выполняются или как у обмоток постоянного тока или как показано на фиг. 18.

Однофазная обмотка получается из трехфазной, если одну из фаз уничтожить. Форма катушек здесь, однако, может быть упрощена, так как лобовые соединения могут быть расположены в одной плоскости. Схема такой обмотки показана на фиг. 16 ($2p = 4, Q = 6, q = 4$).

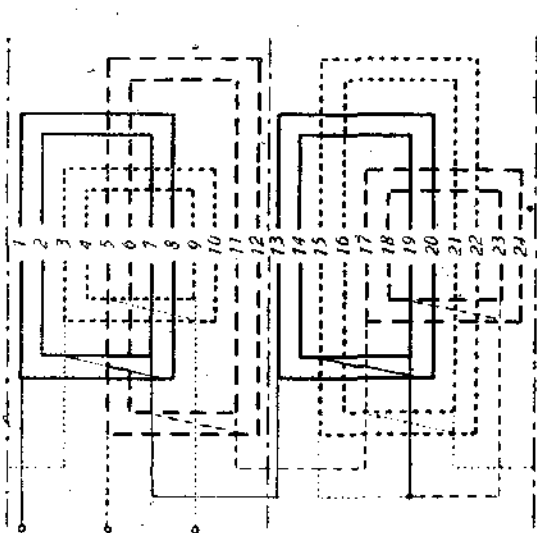
б) Катушечные обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу.

Все рассмотренные нами до сих пор обмотки были выполнены с целым числом впадин на полюс и фазу. Однако, обмотки переменного тока могут быть выполнены и так, чтобы q было дробью, большей или меньшей 1. Тогда $q = \frac{u}{2pt} =$ дробному числу. ³⁾

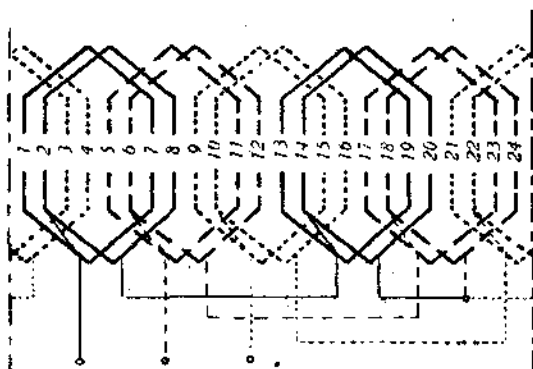
Эти обмотки по сравнению с ранее рассмотренными имеют то преимущество, что отдельные катушечные группы одной и той же фазы сдвинуты между собой, благодаря чему обмоточные коэффициенты высших гармоник сильно уменьшаются и кривая напряжения приближается к чистой синусоиде гораздо больше, чем в обмотках с целым q . Эти же обмотки применяются и в тех случаях, когда из одних и тех же листов собираются статоры машин с различным числом полюсов, так как здесь может встретиться случай, когда число впадин не делится нацело на число полюсов и фаз. Применяют эти обмотки еще также тогда, когда для лучшего использования впадины (машины высокого напряжения с дорогой изоляцией) число впадин выбирается настолько малым, что обмотка с целым q выполнена быть

¹⁾ А у больших машин — из 3 или 4 частей.

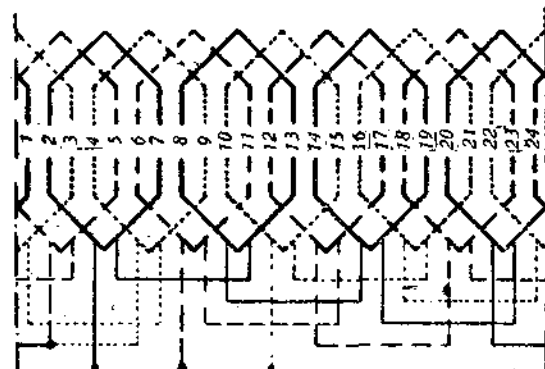
²⁾ Отметим, что в последнее время и европейские (в частности советские) заводы строят довольно большое количество асинхронных двигателей с двухслойными обмотками в статоре.



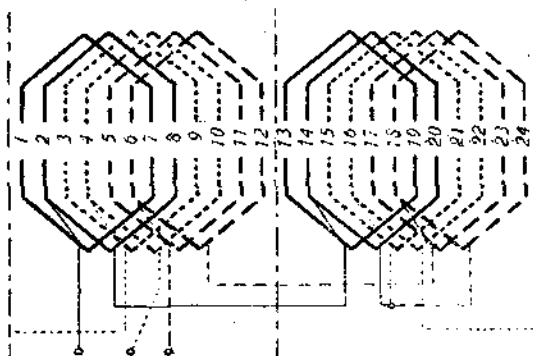
Фиг. 12.



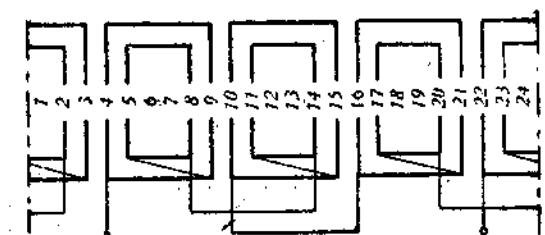
Фиг. 13.



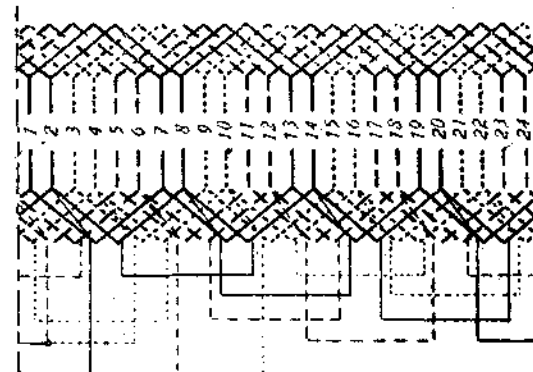
Фиг. 14.



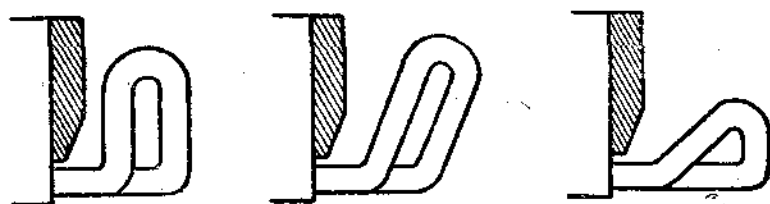
Фиг. 15.



Фиг. 18.



Фиг. 16.



Фиг. 17.

не может или дает кривую напряжения, сильно отличающуюся от синусоиды. Рассмотрим сперва случай, когда все впадины статора заполнены обмоткой¹⁾. Условиями симметрии для этих обмоток являются²⁾

$$\frac{u}{2m} = \gamma = \text{целому числу} \dots \dots \dots (28)$$

$$\frac{2\gamma}{t} = \text{целому числу}, \dots \dots \dots (29)$$

где γ — число катушек в каждой фазе,
 t — наибольший общий делитель для u и p .

В приводимой ниже таблице приведены q и соответствующие u и p для трехфазных обмоток с дробным q , удовлетворяющие условиям (28) и (29).

В приведенной таблице даны числа впадин на полюс и фазу (q) лишь для γ — от 1 до 20 и для p — от 2 до 20. Нахождение q для γ и $p > 20$ не составляет никакого труда, так как из таблицы легко видеть закономерность изменения q .

Прежде чем перейти к описанию отдельных типов обмоток с дробным q , познакомимся с так называемой звездой впадин, предложенной Richter'ом³⁾ и значительно облегчающей рассмотрение обмоток различных типов.

Если расположить напряжения отдельных катушек по величине и по фазе в виде полярной диаграммы, то мы получим ряд лучей, исходящих из одной точки (звезду векторов). В обмотках переменного тока в общем случае отдельные катушки имеют различную ширину, благодаря чему напряжения отдельных катушек не будут равны по величине, даже если число витков во всех катушках будет одинаково. Поэтому и звезда напряжений, представляющая в виде полярной диаграммы напряжения отдельных катушек, будет обладать лучами с более или менее различной длиной. Если, однако, изобразить с помощью полярной диаграммы напряжения отдельных катушечных сторон, то мы получим звезду с совершенно одинаковыми лучами, так как все катушечные стороны содержат одинаковое количество проводников. В этом случае каждой впадине будет соответствовать один луч, и так как впадины расположены на поверхности статора равномерно, то звезда будет правильной, т. е. все углы между отдельными лучами будут одинаковы. Такую полярную диаграмму Richter и называет звездой впадин.

Фазовый угол между двумя соседними впадинами равен

$$\alpha = \frac{p}{u} 360^\circ \dots \dots \dots (30)$$

Если, попрежнему, обозначить через t наибольший общий делитель для u и p , то мы всегда найдем в обмотке t равнофазных впадин, так как тогда

$$\frac{u}{t} \alpha = \frac{p}{t} 360^\circ = g \cdot 360^\circ \dots \dots \dots (31)$$

будет целым кратным 360° .

Кроме того, в звезде впадин мы получим $\frac{u}{t}$ разнофазных впадин (лучей), сдвинутых между собой на углы

$$\alpha' = \frac{t}{u} 360^\circ \dots \dots \dots (32)$$

¹⁾ Практически этот случай осуществляется лишь для многофазных, в частности трехфазных машин, так как (мы уже говорили об этом выше) заполнение всех впадин в однофазных машинах — нецелесообразно.

²⁾ См. R. Richter. Die Ankerwicklungen.

В обмотках с целым числом впадин на полюс и фазу (q) число впадин всегда делится на число пар полюсов, т.е. $t = p$, обмотка имеет p равнофазных впадин и $\alpha = \alpha'$.

Начертим звезду впадин, напр., для трехфазной обмотки с $u = 24$, $p = 2$ и $q = 2$. Если пронумеровать впадины по порядку их последовательного расположения на окружности статора, то фазы впадин или величины и фазы напряжений отдельных катушечных сторон могут быть представлены лучами звезды, изображенной на фиг. 19, при чем равнофазные лучи, напр., впадины 1 и 13, для наглядности показаны здесь друг за другом. С помощью звезды впадин легко спроектировать обмотку. Сначала распределяем впадины по отдельным фазам обмотки. В нашем примере каждая фаза будет содержать $\frac{24}{3} = 8$ катушечных сторон: четыре — с одним направлением ЭДС (положительным) и четыре — с другим (отрицательным)¹⁾. Катушечные стороны с одним и тем же направлением ЭДС должны быть для лучшего использования обмотки (для увеличения обмоточного коэффициента) сдвинуты, по возможности, на меньший угол. Поэтому расположим положительные катушечные стороны во впадинах 1, 2, 13 и 14. Соответствующие лучи обозначены на фиг. 19 сплошными линиями с нумерацией 1—13 и 2—14. Положительные катушечные стороны других фаз должны лежать во впадинах, сдвинутых на 120° , так как лишь при этом условии получится симметричная обмотка. Эти впадины обозначены штриховыми и пунктирными линиями с нумерацией 9—21, 10—22 и 5—17, 6—18. Отрицательные катушечные стороны каждой фазы должны также лежать возможно ближе друг к другу, а по сравнению с соответствующими положительными сторонами они должны быть сдвинуты, по возможности, на 180° . Поэтому отрицательные катушечные стороны должны быть расположены во впадинах, обозначенных: на фиг. 19 для первой фазы лучами 7—19 и 8—20, а для двух других фаз — лучами 3—15, 4—16 и 11—23, 12—24. Теперь можно перейти к соединению соответствующих положительных и отрицательных катушечных сторон в катушки. Это соединение может быть произведено различным образом; следует, однако, сделать его так, чтобы выполнение обмотки было возможно более простым. Для этого чертят катушечные стороны в развернутом виде и отыскивают для них наиболее простые и подходящие к данному случаю соединения. Если лобовые соединения должны быть расположены в двух плоскостях, то можно в фазе, обозначенной сплошными линиями, соединить катушечные стороны: 2 с 7, 1 с 8, 14 с 19 и 13 с 20, и тогда мы получим обмотку, изображенную на фиг. 5.

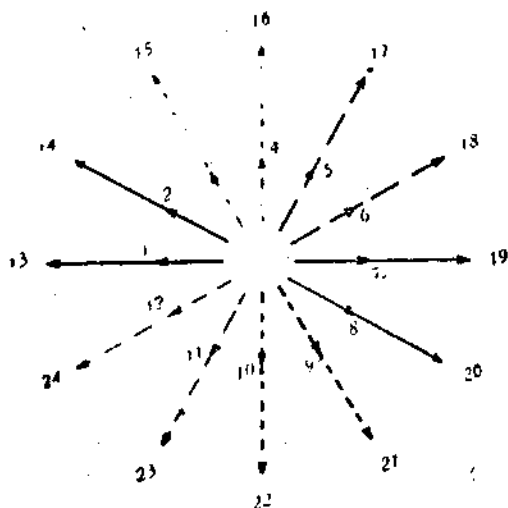
Из звезды впадин легко также найти расположение соединений между отдельными катушками. Эти соединения при последовательном включении катушек должны быть расположены так, чтобы между собой соединялись катушечные стороны с противоположными направлениями ЭДС. Последовательность при этом следует выбирать такой, чтобы соединения выходили, по возможности, короткими. Если, напр., соединить с зажимом машины выходящий из впадины 1 конец катушки 1—8 (ср. фиг. 5), то выходящий из впадины 8 конец катушки можно присоединить либо к 2, либо к 13 или, наконец, к 14. Мы соединяем 8 с 2, так как такое соединение будет наиболее коротким. Подобным же образом соединяем и все остальные катушки. К зажимам машины должны быть присоединены всегда концы катушечных сторон с одинаковым направлением ЭДС. Соединив катушечные стороны в катушки, мы из звезды впадин легко можем получить звезду напряжений катушек, как показано на фиг. 20. Чтобы получить при последовательном соединении катушек полные напряжения отдельных фаз, нужно сложить геометрически напряжения отдельных катушек.

¹⁾ Понятие положительности и отрицательности здесь, конечно, является относительным, так как в ближайший полупериод направления ЭДС изменятся на обратные. Этими терминами мы хотим лишь указать, что в каждый момент существуют четыре катушечных стороны с одним и четыре — с противоположным направлением ЭДС.

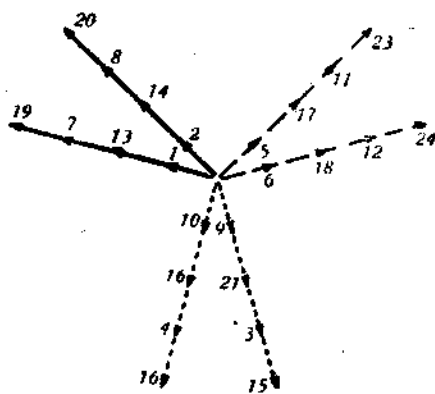
Из фиг. 20 легко получить обмоточный коэффициент, как отношение геометрической суммы напряжений отдельных катушек к их алгебраической сумме, пользуясь найденной нами выше формулой, выведенной из рассмотрения многоугольника напряжений (фиг. 4).

Если для обмоток с целым q звезда впадин и звезда катушечных напряжений играют, сравнительно, второстепенную роль, так как распределение и соединение отдельных катушечных сторон здесь легко могут быть осуществлены с помощью развернутой схемы обмотки, то зато эти диаграммы являются значительным вспомога-

тельным средством при проектировании обмоток с дробным q , где соотношения будут уже значительно более сложными и менее наглядными.



Фиг. 19.



Фиг. 20.

а) Обмотки у которых u и p — числа взаимно простые. Если u и p не имеют общего делителя, то, согласно уравнению (28), γ и p будут также числами взаимно простыми. Число впадин на полюс и фазу всегда может быть представлено выражением

$$q = g + \frac{z}{p}, \dots \dots \dots (33)$$

где g — произвольное целое число (может быть и нуль), а $\frac{z}{p}$ — несокращаемая дробь. В таблице, приведенной на стр. 49, числами q для всех обмоток, у которых число впадин на полюс и фазу может быть выражено уравнением (33), являются числа, не помещенные в $\square$. В этом параграфе мы будем рассматривать лишь трехфазные обмотки для нечетного числа пар полюсов, так как, согласно уравнению (28), u всегда будет четным, и при условии, чтобы u и p были числами взаимно простыми, все четные p исключаются.

Так как здесь $t = 1$, то равнофазных впадин в этих обмотках не существует, и звезда впадин будет здесь состоять из u симметрично расположенных лучей. Эта звезда будет эквивалентна одной из p звезд обмотки с целым q , у которой полное число впадин равно $p \cdot u$ или у которой число впадин на полюс и фазу равно γ . Соседние лучи составляют в звезде угол (уравнение 32)

$$\alpha' = \frac{1}{u} 360^\circ,$$

в то время как угол между двумя соседними впадинами (уравнение 30)

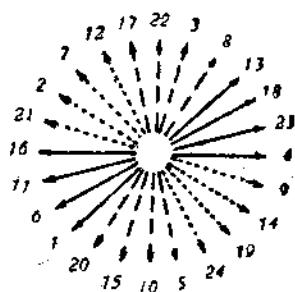
$$\alpha = \frac{p}{u} 360^\circ = p\alpha'.$$

Поэтому здесь впадины, лежащие рядом на поверхности статора, сдвинуты друг от друга на p лучей.

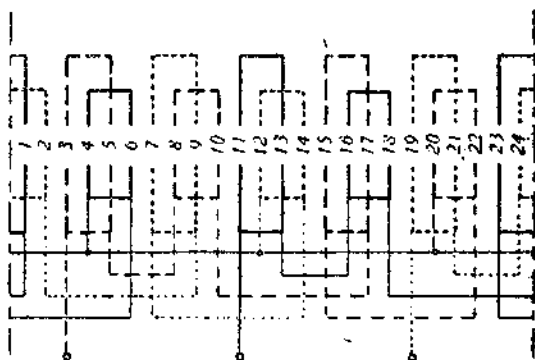
На фиг. 21 вычерчена звезда впадин для трехфазной обмотки с $u = 24$ и $p = 5$. В этом случае

$$q = \frac{u}{2pt} = \frac{24}{30} = \frac{4}{5}$$

Если впадине 1 будет соответствовать луч 1, то лучи, соответствующие впадинам 2, 3, 4 и т. д., мы найдем, если будем каждый раз смещаться вперед на $p = 5$ лучей, или перепрыгивать через $p - 1 = 4$ луча. Исходя из этого, на фиг. 21 и проставлены цифры, обозначающие последовательную нумерацию впадин. На фиг. 21 отдельные фазы обмотки показаны различной штриховкой.



Фиг. 21.



Фиг. 22.

Для получения наибольшей экономии в меди следует соединять в катушки такие катушечные стороны, чтобы получались, по возможности, короткие лобовые соединения, т.е. катушечные стороны, лежащие, по возможности, в близко расположенных друг к другу впадинах. Так, напр., для фазы, вычерченной сплошными линиями, мы получим наиболее короткие лобовые соединения, если мы соединим впадины: 1 и 23, 6 и 4, 11 и 13, 16 и 18. Эти соединения и подобные же соединения для двух других фаз показаны на фиг. 22.

Вообще говоря, следует предпочитать двухэтажное расположение головок, которое в данном примере с $q < 1$ возможно без изогнутой переходной катушки, как это было в обмотках с целым q при p нечетном (ср. фиг. 12).

Для вычерчивания развернутой схемы обмотки не всегда необходимо вычерчивание звезды впадин. Можно обойтись определением шага по впадинам

$$r = \frac{g \cdot u + 1}{p}, \dots \dots \dots (34)$$

где g — произвольное целое число. Обычно для g берут наименьшее целое число, которое удовлетворяет уравнению (34). В нашем примере можно взять $g = 1$, так как при этом

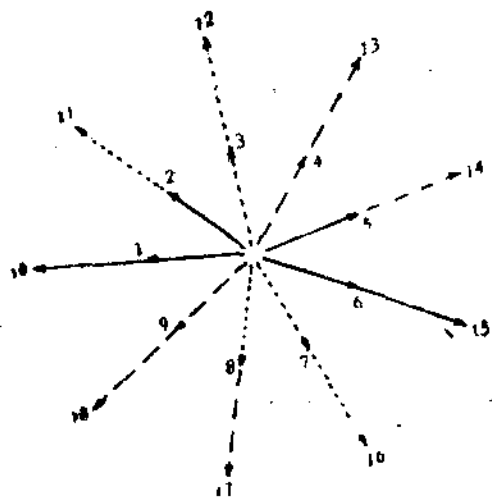
$$r = \frac{1 \cdot 24 + 1}{5} = 5 = \text{целому числу.}$$

Вычерчивание обмотки производится следующим образом. Сперва находим $\gamma = 5$ положительных катушечных сторон первой фазы. Если начать с впадины 1, то мы получим: 1, 6, 11, 16. Ближайшие четыре впадины, сдвинутые на шаг $r = 5$, дадут нам отрицательные катушечные стороны третьей фазы: 21, 2, 7, 12 (ср. фиг. 21), а следующие четыре впадины — положительные катушечные стороны второй фазы: 17, 22, 3, 8. Продолжая шагание в том же направлении, мы полу-

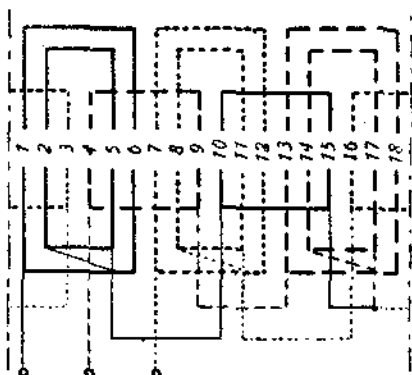
чим: отрицательные катушечные стороны первой фазы: 13, 18, 23, 4, положительные—третьей фазы: 9, 14, 19, 24 и, наконец, отрицательные—второй фазы: 5, 10, 15, 20. Теперь остается только вычертить лобовые соединения и соединить отдельные катушки между собой.

Что касается обмоточных коэффициентов для обмоток этого параграфа, то они могут быть взяты из приведенной выше таблицы для обмоток с целым q , если вместо q брать величину γ , так как напряжения отдельных катушечных сторон имеют здесь такое же положение в звезде напряжений, как катушечные стороны одной пары полюсов обмотки с $q = \gamma$ впадинами на полюс и фазу.

В) Трехфазные обмотки с $\gamma =$ нечетному числу, при наличии u и p общего наибольшего делителя, равного 2. В этих обмотках γ и p также должны быть числами взаимно простыми, так как, согласно уравнению (28), $u = 2 \cdot m \cdot \gamma$ и наибольший общий делитель u и p равен 2. Поэтому здесь число впадин на полюс и фазу также выражается уравнением (33). К рассматриваемым обмоткам принадлежат все трехфазные обмотки, не вошедшие в отдел (а). В таблице на стр. 49 эти обмотки характеризуются числами впадин на полюс и фазу, не помещенными в $\square$ при четных числах пар полюсов.



Фиг. 23.



Фиг. 24.

В качестве примера рассмотрим четырехполюсную ($p = 2$) обмотку с $u = 18$, т.е. с $q = 1\frac{1}{2}$. Так как u и p имеют общий наибольший делитель $t = 2$, то здесь всегда будут иметься две равнофазные впадины. Звезда впадин будет для этой обмотки иметь вид, показанный на фиг. 23, при чем соседние лучи будут соответствовать и соседним впадинам, так как $t = p$ [ср. уравнения (30) и (31)]. Для лучшего использования обмотки, т.е. для получения возможно большего обмоточного коэффициента, катушечные стороны с одним и тем же направлением ЭДС должны лежать как можно ближе друг к другу. Две впадины имеют одну и ту же фазу; но так как число катушечных сторон является нечетным и равно $\gamma = 8$, то одна из катушечных сторон каждой фазы будет совпадать с одной из катушечных сторон другой фазы, с таким же направлением ЭДС (на фиг. 23 впадины: 2 и 11, 5 и 14, 8 и 17).

Что касается вычерчивания развернутой схемы обмотки, то здесь нет ничего нового по сравнению со сказанным в отделе (а). И здесь отдельные катушечные стороны должны быть соединены так, чтобы получались наиболее короткие и удобно расположенные лобовые соединения. Схема обмотки, для которой вычерчена звезда, изображенная на фиг. 23, показана на фиг. 24. Лобовые соединения расположены

здесь в двух этажах. Все обмотки этого отдела с $p = 2$ и 4 могут быть выполнены в виде двухэтажных. Что касается обмоточных коэффициентов, то они могут быть взяты из следующей таблицы.

γ	1	2	3	4	6	10	20	∞
f_1	0,866	0,933	0,954	0,950	0,952	0,954	0,954	0,955

γ) Остальные симметричные трехфазные обмотки с дробным q . В отделах (α) и (β) мы рассмотрели все обмотки с $t = 1$ и обмотки с $t = 2$ при $\gamma =$ нечетному числу. Эти обмотки удовлетворяют уравнению (33), и числа q для этих обмоток в таблице на стр. 49 не помещены в $\square$. Все остальные обмотки с дробным q можно получить из рассмотренных в отделах (α) и (β), умножая u и p на одно и то же число t' . При этом получается всегда такое число одинаковых ветвей обмотки, которое в t' раз больше, чем у первоначальной обмотки, т.е. равное t' или $2t'$, в зависимости от того, нечетным или четным было число катушек на фазу у первоначальной обмотки. Таким образом, новую обмотку можно получить, если на развернутой схеме первоначальной обмотки наложить t' одинаковых обмоток одна на другую. Число впадин на полюс и фазу остается в новой обмотке таким же, как в первоначальной. Из таблицы, приведенной на стр. 49, легко видеть, что одинаковые значения q лежат на лучах, идущих сверху и слева — вниз и направо. Эти лучи начинаются у таких u и p , для которых выполнима обмотка с $t' = 1$. Значения q для этих обмоток, которые можно назвать „первоначальными“, не помещены в $\square$, для производных же обмоток — помещены в $\square$. Обмоточные коэффициенты для производных обмоток будут такими же, как и для первоначальных.

δ) Однофазные обмотки с пропущенными впадинами. Из каждой обмотки с целым q можно получить обмотку с дробным q , если увеличить на 1 число впадин обмотки с целым q и распределить их равномерно по поверхности якоря. Однофазные обмотки, у которых число фаз $m = 1$, согласно уравнению (28), всегда являются симметричными.

Если обозначить через η число незаполненных обмоткой (пропущенных) впадин, а через γ — попрежнему число катушек на фазу (в данном случае полное число катушек), то число впадин однофазной обмотки

$$u = 2\gamma + \eta, \quad (35)$$

где η , вообще говоря, не может быть взято произвольно.

Для возможности выполнения обмотки с дробным q достаточно того, чтобы

$$Q = \frac{u}{2p \cdot m} = \text{дробному числу} \quad (36)$$

Число заполненных впадин q на полюс и фазу может быть при этом целым или дробным. Если

$$q = \frac{\gamma}{p} = \text{целому числу}, \quad (37)$$

то, согласно уравнению (35),

$$\frac{\eta}{2p} = \text{дробному числу}, \quad (38)$$

так как при этом, согласно уравнению (36), при $m = 1$,

$$Q = \frac{u}{2p} = q + \frac{\eta}{2p}$$

будет дробным числом.

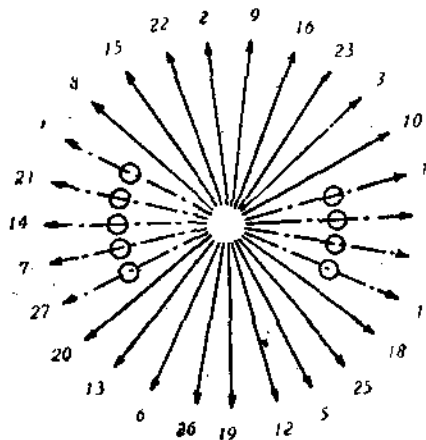
Из рассматриваемых обмоток практическое значение имеют лишь те, у которых u и p не имеют общего делителя. При этом все впадины будут разнофазными. Рассмотрим обмотку с $u = 27$ и $p = 4$.

В этом случае звезда впадин (фиг. 25) будет иметь 27 лучей. Цифры, стоящие у лучей, соответствуют порядковой нумерации впадин. Соседние впадины (напр., 1 и 2) сдвинуты друг от друга на $p = 4$ луча.

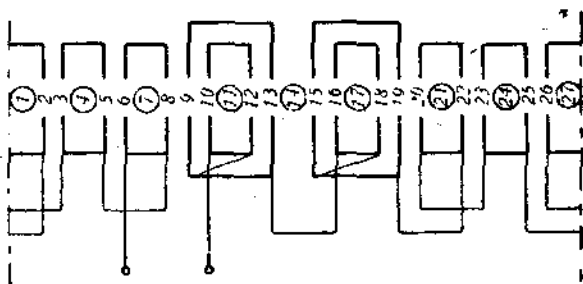
В данном случае обмотка, как это обычно и делается в однофазных машинах, заполняет $\frac{2}{3}$ всех впадин. Тогда, согласно уравнению (35), $\gamma = \eta = 9$, и число впадин на полюс и фазу

$$q = \frac{18}{8} = 2\frac{1}{4}.$$

Для хорошего использования обмотки, напряжения катушечных сторон с одинаковым направлением ЭДС должны быть сдвинуты на возможно меньший угол и, кроме того, результирующие напряжений всех положительных и всех отрицательных катушечных сторон должны, по возможности, быть сдвинуты на 180° . В соответствии с этим и начерчена звезда на фиг. 25, где пунктирными линиями с кружками показаны пропущенные впадины. На фиг. 26 показана обмотка в развернутом виде.



Фиг. 25.



Фиг. 26.

В качестве примера обмотки с целым числом обмотанных впадин на полюс и фазу возьмем $p = 3$ и $\gamma = 9$. Число незаполненных впадин, согласно уравнению (38), должно быть выбрано таким, чтобы оно не делилось на p . Для того чтобы u и p были взаимно простые числа и чтобы обмоткой было заполнено около $\frac{2}{3}$ всех впадин, возьмем $\eta = 8$. Тогда

$$u = 2\gamma + \eta = 26, \quad Q = \frac{26}{6} = 4\frac{1}{3}, \quad q = \frac{18}{6} = 3.$$

Звезда впадин и развернутая схема для этой обмотки показаны на фиг. 27 и 28.

Обмоточные коэффициенты для этих обмоток практически совпадают с приведенными на стр. 42 обмоточными коэффициентами для однофазных обмоток при заполнении $\frac{2}{3}$ всех впадин, при чем вместо q нужно брать значение γ .

е) Трехфазные обмотки с пропущенными впадинами, если u и p — числа взаимно простые. В симметричных трехфазных обмотках, согласно уравнению (28), число обмотанных впадин должно быть кратным 6, а общее число разнофазных впадин $\left(\frac{u}{t}\right)$ должно быть кратным 3. Таким образом, полное число впадин здесь выразится формулой

$$u = 6\gamma + \eta, \quad \dots \dots \dots (39)$$

где число пропущенных впадин η определяется уравнением

$$\frac{u}{3t} = \frac{6\gamma + \eta}{3t} = \text{целому числу} \quad \dots \dots \dots (40)$$

Если мы ограничимся наиболее важным для практики случаем, когда η является наименьшим возможным числом, т.е. когда $\eta = 3$, то число впадин

$$u = 6\gamma + 3 \dots \dots \dots (41)$$

n , согласно уравнению (40), должно быть

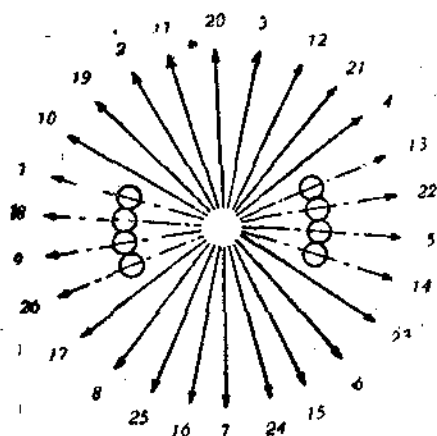
$$\frac{2\gamma + 1}{t} = \text{целому числу} \dots \dots \dots (42)$$

В приводимой ниже таблице даны отношения

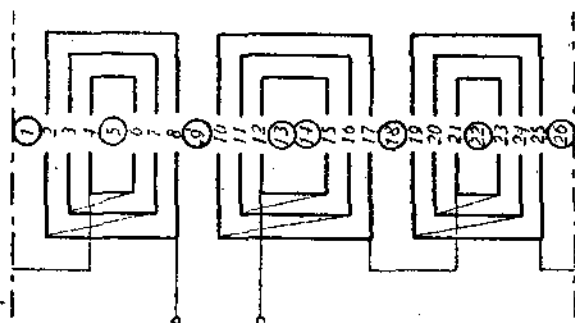
$$Q = \frac{u}{2pt}$$

для всех симметричных обмоток с тремя пропущенными впадинами.

Для обмоток, у которых u и p не имеют общего делителя ($t = 1$), у которых, следовательно, равнофазных впадин не имеется, цифры Q не помещены в $\square$



Фиг. 27.



Фиг. 28.

и напечатаны простым шрифтом. Для обмоток, которые могут быть выполнены с целым q , целые части Q напечатаны жирным шрифтом. В этих случаях q равно целой части Q .

В рассматриваемых обмотках, согласно уравнению (41), число впадин u должно быть кратным 3. Поэтому рассматриваемые в этом отделе обмотки невыполнимы для всех пар полюсов, кратных 3. Таким образом, рассматриваемые обмотки могут быть выполнены лишь для тех пар полюсов, что и обмотки отдела (а) с полным числом обмотанных впадин, но здесь мы имеем несколько большую свободу в выборе числа впадин и катушек и, кроме того, здесь можно достигнуть почти полного устранения высших гармонических.

В качестве примера возьмем восьмиполюсную ($p = 4$) обмотку с 27 впадинами. Звезда впадин для этой обмотки представлена на фиг. 29.

Для того чтобы обмотка была симметричной, необходимо, чтобы лучи, соответствующие незаполненным впадинам, были сдвинуты на 120° (напр., лучи 1, 10 и 19). Для возможно лучшего использования обмотки $\gamma = 4$ лучам катушечных сторон с одинаково направленными ЭДС, принадлежащих к одной фазе, должны на диаграмме лежать рядом, — лучше всего, хотя это и не является необходимым, — так, чтобы между ними не было незаполненной впадины. Развернутая схема обмотки, полученная обычным путем, показана на фиг. 30. Для этой обмотки

$$Q = \frac{27}{24} = 1\frac{1}{8}, \quad q = \frac{24}{24} = 1.$$

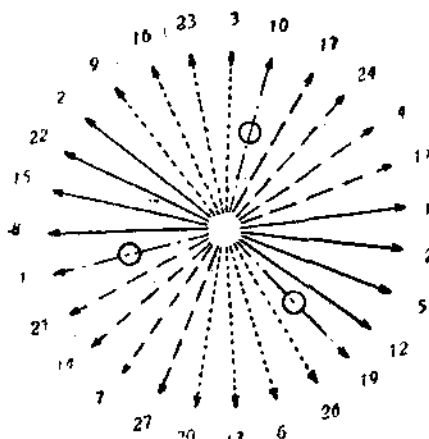
$\gamma =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$u=6\gamma+3=$	9	15	21	27	33	39	45	51	57	63	69	75	81	87	93	99	105	111	117	123
1	$1\frac{1}{2}$	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{2}$	$4\frac{1}{2}$	$5\frac{1}{2}$	$6\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	$8\frac{1}{2}$	$9\frac{1}{2}$	$10\frac{1}{2}$	$11\frac{1}{2}$	$12\frac{1}{2}$	$13\frac{1}{2}$	$14\frac{1}{2}$	$15\frac{1}{2}$	$16\frac{1}{2}$	$17\frac{1}{2}$	$18\frac{1}{2}$	$19\frac{1}{2}$	$20\frac{1}{2}$
2	$\frac{3}{4}$	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{3}{4}$	$2\frac{1}{4}$	$2\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{3}{4}$	$4\frac{1}{4}$	$4\frac{3}{4}$	$5\frac{1}{4}$	$5\frac{3}{4}$	$6\frac{1}{4}$	$6\frac{3}{4}$	$7\frac{1}{4}$	$7\frac{3}{4}$	$8\frac{1}{4}$	$8\frac{3}{4}$	$9\frac{1}{4}$	$9\frac{3}{4}$	$10\frac{1}{4}$
3	$\frac{1}{2}$	—	—	$\frac{1}{2}$	—	—	$\frac{1}{2}$	—	—	$\frac{1}{2}$	—	—	$\frac{1}{2}$	—	—	$\frac{1}{2}$	—	—	$\frac{1}{2}$	—
4	$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{7}{8}$	$1\frac{1}{8}$	$1\frac{3}{8}$	$1\frac{5}{8}$	$1\frac{7}{8}$	$2\frac{1}{8}$	$2\frac{3}{8}$	$2\frac{5}{8}$	$2\frac{7}{8}$	$3\frac{1}{8}$	$3\frac{3}{8}$	$3\frac{5}{8}$	$3\frac{7}{8}$	$4\frac{1}{8}$	$4\frac{3}{8}$	$4\frac{5}{8}$	$4\frac{7}{8}$	$5\frac{1}{8}$
5	$\frac{9}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	$1\frac{1}{16}$	$1\frac{3}{16}$	$1\frac{5}{16}$	$1\frac{7}{16}$	$1\frac{9}{16}$	$1\frac{11}{16}$	$1\frac{13}{16}$	$1\frac{15}{16}$	$2\frac{1}{16}$	$2\frac{3}{16}$	$2\frac{5}{16}$	$2\frac{7}{16}$	$2\frac{9}{16}$	$2\frac{11}{16}$	$2\frac{13}{16}$	$2\frac{15}{16}$
6	$\frac{1}{4}$	—	—	$\frac{1}{4}$	—	—	$\frac{1}{4}$	—	—	$\frac{1}{4}$	—	—	$\frac{1}{4}$	—	—	$\frac{1}{4}$	—	—	$\frac{1}{4}$	—
7	$\frac{3}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{5}{16}$
8	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$
9	$\frac{7}{16}$	—	—	$\frac{7}{16}$	—	—	$\frac{7}{16}$	—	—	$\frac{7}{16}$	—	—	$\frac{7}{16}$	—	—	$\frac{7}{16}$	—	—	$\frac{7}{16}$	—
10	$\frac{9}{16}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{11}{16}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{13}{16}$	$\frac{9}{16}$
11	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{5}{8}$
12	$\frac{3}{8}$	—	—	$\frac{3}{8}$	—	—	$\frac{3}{8}$	—	—	$\frac{3}{8}$	—	—	$\frac{3}{8}$	—	—	$\frac{3}{8}$	—	—	$\frac{3}{8}$	—
13	$\frac{5}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{13}{8}$	$\frac{13}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{13}{8}$	$\frac{13}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{13}{8}$	$\frac{13}{8}$	$\frac{5}{8}$
14	$\frac{7}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{11}{8}$	$\frac{11}{8}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{11}{8}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{11}{8}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{11}{8}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{7}{8}$
15	$\frac{9}{8}$	—	—	$\frac{9}{8}$	—	—	$\frac{9}{8}$	—	—	$\frac{9}{8}$	—	—	$\frac{9}{8}$	—	—	$\frac{9}{8}$	—	—	$\frac{9}{8}$	—
16	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$
17	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{3}{2}$
18	$\frac{5}{2}$	—	—	$\frac{5}{2}$	—	—	$\frac{5}{2}$	—	—	$\frac{5}{2}$	—	—	$\frac{5}{2}$	—	—	$\frac{5}{2}$	—	—	$\frac{5}{2}$	—
19	$\frac{7}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{11}{2}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{15}{2}$	$\frac{7}{2}$
20	$\frac{9}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{17}{2}$	$\frac{17}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{17}{2}$	$\frac{17}{2}$	$\frac{9}{2}$	$\frac{13}{2}$	$\frac{17}{2}$	$\frac{17}{2}$	$\frac{9}{2}$

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

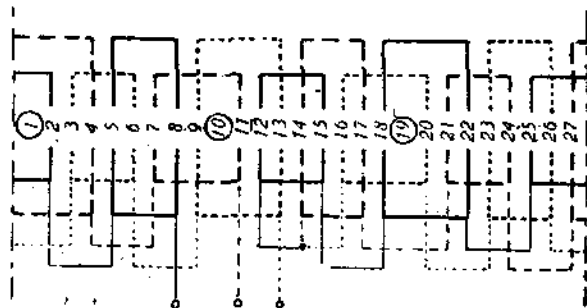
Обмоточные коэффициенты для обмоток этого отдела приведены в следующей таблице.

γ	1	2	3	4	6	10	20	∞
k_1	0,985	0,973	0,963	0,965	0,962	0,959	0,957	0,955

5) Другие симметричные трехфазные обмотки с стремя пропущенными впадинами ($t > 1$). Между числом катушек γ одной фазы и делителем t существует соотношение, выражаемое уравнением (42), из которого следует, что число t должно быть нечетным. Поэтому обмотки этого отдела невыполнимы при числах пар полюсов p , представляющих степени числа 2 (2, 4, 8, 16 и т.д.). Для всех остальных p эти обмотки могут быть выполнены вполне симме-



Фиг. 29.



Фиг. 30.

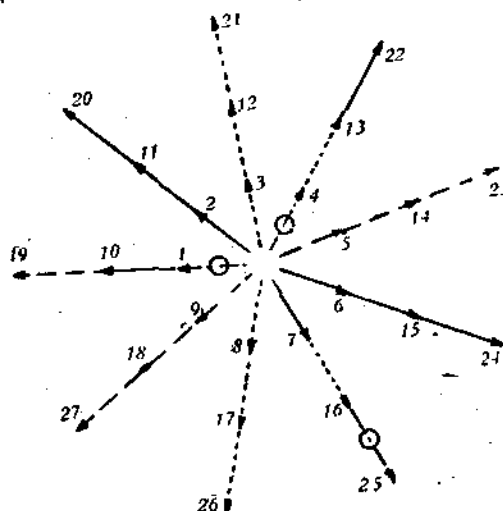
тричными. Особенное значение приобретают эти обмотки для весьма часто встречающегося числа $p=3$, для которого, как мы видели, обмотки с дробным q и с полным числом заполненных впадин невыполнимы. В таблице, приведенной на стр. 57, числа Q для рассматриваемых обмоток помещены в $\square$. В качестве примера рассмотрим шестиполюсную обмотку ($p=3$) с 27 впадинами. В этом случае

$$Q = \frac{27}{18} = 1\frac{1}{2}, \quad \gamma = 4, \quad q = \frac{24}{18} = 1\frac{1}{3}.$$

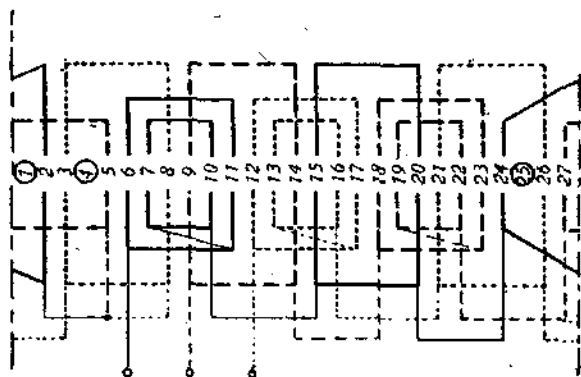
Так как $t=3$, то число равнофазных впадин будет равно трем. Звезда впадин поэтому будет иметь вид, показанный на фиг. 31. Соседние лучи здесь соответствуют соседним впадинам, так как $t=p$ [см. уравнения (30) и (32)]. Три незаполненных впадины должны составлять углы в 120° , поэтому, если мы пропускаем впадину 1, то нужно оставить также незаполненными впадины 4, или 13, или 22 и 7, или 16, или 25. Какое из этих выполнений является наиболее целесообразным, можно установить, вычертив обмотку в развернутом виде. При выполнении обмотки в виде двухэтажной (фиг. 32), мы оставляем свободными впадины 1, 4 и 25.

Если переложить катушечную сторону 13 в незаполненную впадину 4, то легко получить схему обмотки для статора, разделенного на три части, как показано на фиг. 33. Для составления правильной схемы обмотки здесь необходим, конечно, некоторый опыт.

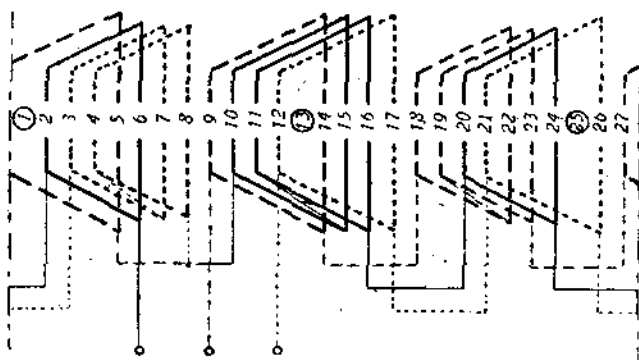
В обмотках с разными p , но с тем же t , звезды впадин отличаются друг от друга только нумерацией впадин. Рядом лежащим впадинам соответствуют при этом лучи, сдвинутые на $\frac{p}{t}$ [ср. уравнения (30) и (32)].



Фиг. 31.



Фиг. 32.



Фиг. 33.

Обмоточные коэффициенты для обмоток этого отдела имеют следующие значения.

t	γ	f_1	t	γ	f_1	t	γ	f_1	t	γ	f_1
3	1	0,866	5	2	0,866	7	3	0,866	9	4	0,866
	4	0,955		7	0,951		10	0,949		13	0,948
	7	0,943		12	0,955		17	0,954		22	0,953
	10	0,958		17	0,956		24	0,955		31	0,955
	13	0,957		22	0,955		31	0,955		40	0,955
	19	0,957		32	0,956		45	0,955		58	0,955
	31	0,956		52	0,955		73	0,955		94	0,955
	61	0,956		102	0,954		143	0,955		184	0,955
	∞	0,955		∞	0,955		∞	0,955		∞	0,955

η) Трехфазные обмотки с числом пропущенных впадин > 3 . Из обмоток, рассмотренных в отделах (е) и (з), можно получить новые обмотки с тем же числом Q , если умножить u и p первоначальной обмотки на одно и то же число t' . Тогда катушки каждой фазы будут распадаться на t' отдельных ветвей. Число незаполненных впадин будет здесь равно $3t'$. В остальном проектирование этих обмоток ничем новым не отличается. Обмоточные коэффициенты здесь будут таковы же, как и для первоначальных обмоток.

с) Катушечные обмотки, состоящие из двух или нескольких параллельных ветвей.

До сих пор мы предполагали, что все катушки каждой фазы соединены последовательно. При больших силах тока, однако, сечения проводников выходят слишком большими, благодаря чему, с одной стороны, затрудняется изготовление обмотки, а с другой — увеличиваются добавочные потери в меди. В этих случаях приходится прибегать к параллельному соединению катушек между собой. Для того чтобы общий

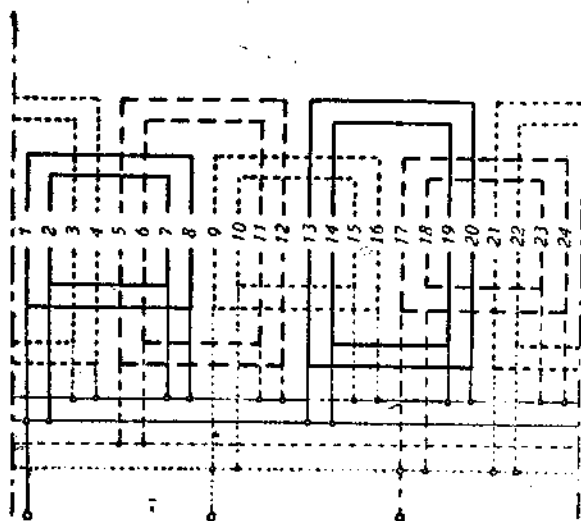
ток машины равномерно распределялся по отдельным ветвям, необходимо не только, чтобы ЭДС ветвей были равны при холостом ходе, но и чтобы эти ветви обладали одинаковыми сопротивлениями и индуктивностями. Так как, однако, форма и расположение катушек и лобовых соединений сравнительно мало влияют на сопротивление и индуктивность, то практически достаточным можно считать именно первое условие, а именно, равенство ЭДС при холостом ходе.

Возможное число параллельных ветвей обмотки может быть найдено из звезды впадин, однако для обмоток с целым q можно обойтись без вычерчивания этой диаграммы. Параллельно могут

быть соединены такие ветви или катушки, которые при одинаковом числе витков сдвинуты на $k \cdot \tau$, где τ — полюсное деление, а k — произвольное целое число. Число ветвей одинакового напряжения (по величине и по фазе) в обмотках с целым q равно по меньшей мере числу пар полюсов p , а в большинстве случаев — числу полюсов $2p$. Число ветвей, равное p , имеют лишь обмотки, изображенные на фиг. 13 и 15, в других же случаях, если q — четное число, получается $2p$ параллельных ветвей. Для обмоток, изображенных на фиг. 8 и 11, это очевидно сразу, так как здесь в каждой фазе имеется $2p$ одинаковых катушечных групп. В остальных обмотках (фиг. 5, 7, 12) каждая из p катушечных групп может быть разбита еще на две части так, чтобы ширина катушек одной части была настолько же больше полюсного деления, насколько меньше его ширина катушек другой части.

При нечетном числе q на полюс и фазу число одинаковых ветвей будет только p . Примерами параллельного соединения могут служить обмотки, показанные на фиг. 34 ($q = 2 =$ четному числу, число параллельных ветвей $= 2p = 4$) и на фиг. 35 ($q = 5 =$ нечетному числу, число параллельных ветвей $= p = 2$).

В обмотках с дробным числом впадин на полюс и фазу соотношения уже не будут столь простыми, и для нахождения числа возможных параллельных ветвей здесь проще всего исходить из звезды впадин.

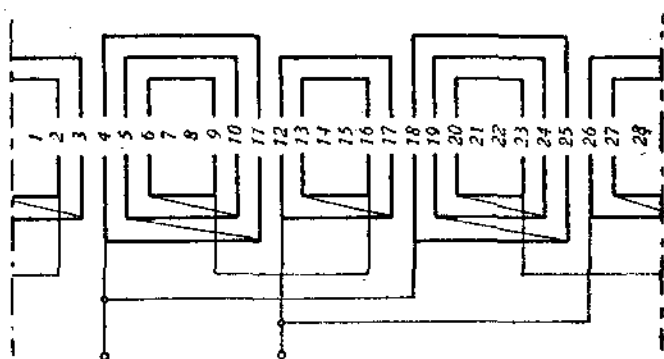


Фиг. 34.

Для обмоток типа (α), как мы уже упоминали выше, звезда впадин совпадает с одной из p звезд обмотки с целым q , у которой полное число впадин равно $p \cdot q$ или у которой число впадин на полюс и фазу равно γ . Поэтому при нечетном числе катушек в фазе ($\gamma = \text{нечетному числу}$) все катушки должны быть соединены последовательно, а при четном числе катушек в фазе ($\gamma = \text{четному числу}$) всегда будет возможным соединить параллельно две ветви.

Обмотки типа (β) могут быть осуществлены только в виде последовательных, так как γ здесь всегда, по условию, число нечетное.

В производных обмотках типа (γ) число возможных параллельных ветвей будет в l' раз больше, чем у соответствующей первоначальной обмотки, т.-е. оно будет равно l' или $2l'$, в зависимости от того, было ли число катушек одной фазы первоначальной обмотки нечетным или четным.



Фиг. 35.

Что касается обмоток типа (δ), то, рассматривая фиг. 25 и 27, мы видим, что параллельные ветви возможны только в том случае, если как u , так и γ — числа четные. Наибольшее возможное число параллельных ветвей здесь равно 2.

Так как число впадин в обмотках типа (ϵ) является всегда числом нечетным, то эти обмотки выполнимы лишь в виде последовательных.

В обмотках типа (ζ) параллельных ветвей также не имеется.

Наконец, в обмотках типа (η) число параллельных ветвей составляет l' . Так как обмотки типа (η) выполнимы также и для $p = 1$, то в производных от них обмотках типа (η) всегда можно получить p параллельных ветвей, при чем число пропущенных впадин будет $3p$.

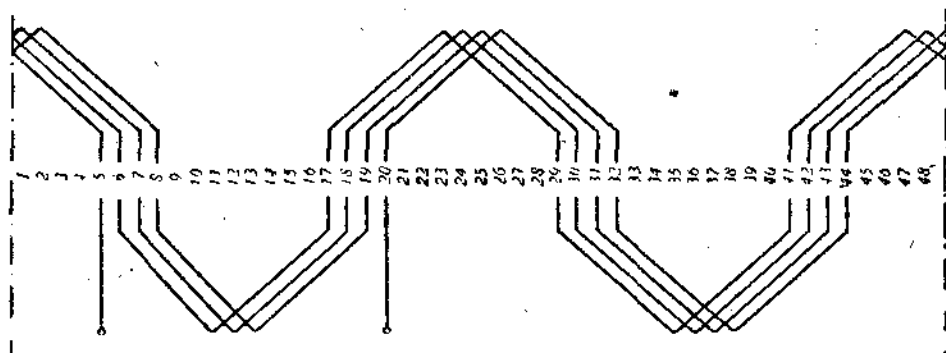
а) Стержневые обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу.

Стержневыми называются обычно обмотки, каждая катушка которых состоит лишь из одного витка. Все рассмотренные нами катушечные обмотки выполнимы, конечно, и в виде стержневых; однако, при некоторых обстоятельствах стержневые обмотки могут быть выполнены и с нечетным числом катушечных сторон, и в этом случае начало и конец фазы лежат на противоположных сторонах якоря. Соединения отдельных стержней производятся с помощью дуг или вилочек, при чем обмотка в обоих случаях может быть или петлевой или волновой. Последняя форма удобнее, так как при этом соединения получаются проще и расход меди обычно бывает меньше. Вилочные соединения лежат, подобно тому как в обмотках постоянного тока, всегда в двух этажах, в то время как соединения дугами являются одноэтажными.

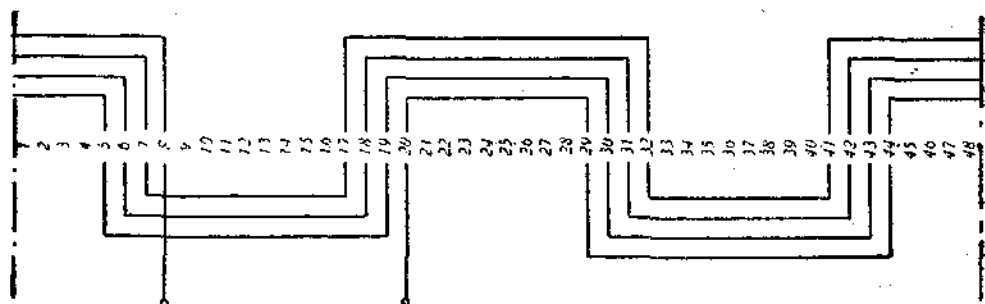
Типичная обмотка с вилочными соединениями ($p = 2$, $q = 4$) показана на фиг. 36. Для наглядности здесь вычерчена лишь одна фаза. Типичная обмотка

с дугowymi соединениями ($p = 2, q = 4$) показана на фиг. 37. При нечетном числе пар полюсов в обмотке с дугowymi соединениями одно из лобовых соединений для возможности перехода из одной плоскости в другую должно быть выполнено в виде вилки (ср. катушечную обмотку на фиг. 7).

В вилочной обмотке (фиг. 36) большая часть вилок соединяет между собой стержни, отстоящие друг от друга на полюсное деление, и лишь для $q - 1 = 3$ соединений шаг укорочен. Можно также выполнить обмотку и с $q - 1 = 3$ удлин-



Фиг. 36.



Фиг. 37.

ными соединениями. Первый способ дает большую экономию в меди, зато второй — большое удобство при ремонте.

Обмотки, изображенные на фиг. 36 и 37, аналогичны катушечной обмотке фиг. 5.

е) Стержневые обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу.

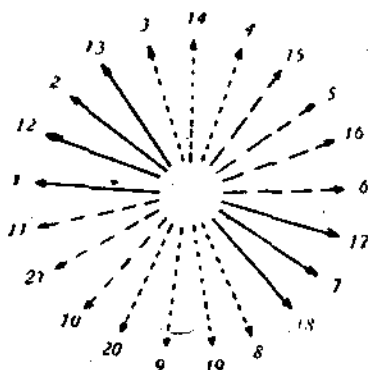
Рассмотренные нами в разделе (b) обмотки с дробным q могут быть точно так же выполнены в виде стержневых. В последнем случае, однако, число катушечных сторон одной фазы (2τ) может быть также и нечетным, хотя эта конструкция возможна лишь при таких многофазных системах, в которых сумма токов в любой момент равна нулю, т.-е. в системах без нулевого провода¹⁾, так как в противном случае, в частности в однофазной обмотке, будет происходить круговое намагничивание охватывающего обмотку железа.

Возможность выполнения стержневых обмоток с дробным q точно так же определяется уравнениями (28) и (29). Так как в стержневых обмотках τ может быть и дробью с знаменателем, равным 2, то здесь мы меньше ограничены в выборе числа

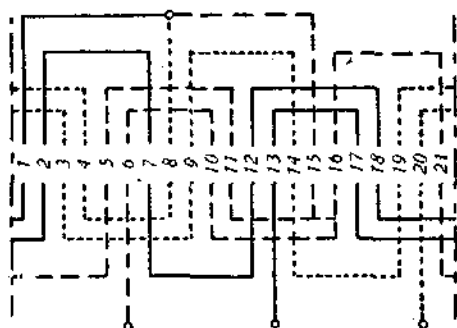
¹⁾ Это условие в асинхронных двигателях соблюдено всегда.

впадин, чем в случае катушечной обмотки. Рассмотрим обмотку с $\gamma = 3\frac{1}{2}$, т.е. $2\gamma = 7$ стержням в каждой фазе, при $p = 2$. Число впадин будет $2\gamma \cdot 3 = 21$. Условия (28) и (29), таким образом, выполнены. Звезда впадин и развернутая схема этой обмотки показаны на фиг. 38 и 39.

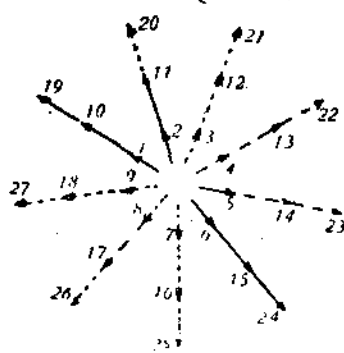
Стержневая обмотка с дробным q может быть выполнена и при p , кратном 3, т.е. в случае, когда катушечная обмотка со всеми заполненными впадинами невыполнима. Напр., для трехфазной обмотки с $p = 3$ число впадин $u = 27$ удовлетво-



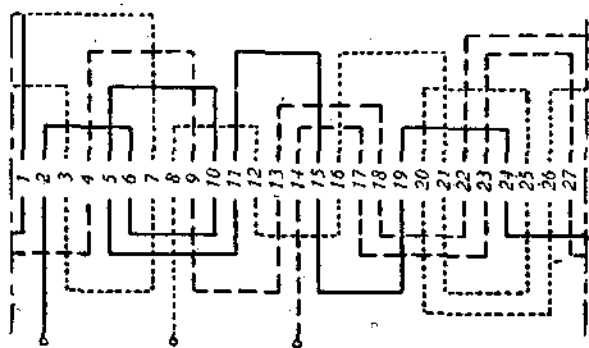
Фиг. 38.



Фиг. 39.



Фиг. 40.



Фиг. 41.

ряет уравнению (28). При этом $\gamma = \frac{u}{6} = 4\frac{1}{2}$, т.е. уравнение (29) также удовлетворено. Звезда впадин и развернутая схема этой обмотки показаны на фиг. 40 и 41.

Д) Стержневые обмотки, состоящие из двух или нескольких параллельных ветвей.

Число возможных параллельных ветвей в стержневых обмотках можно найти из звезды впадин. Из этой же звезды мы можем также найти, какие катушечные стороны должны быть соединены последовательно для получения одной ветви. Вообще говоря, это соединение может быть произведено различным образом, и наиболее целесообразные соединения могут быть найдены из развернутой схемы обмотки. Отдельные стержни, соединяемые последовательно, следует распределять, по возможности, равномерно под всеми полюсами, чтобы получить волновую обмотку. На фиг. 42 показана схема четырехполюсной обмотки с $q = 2$ и двумя параллельными ветвями.

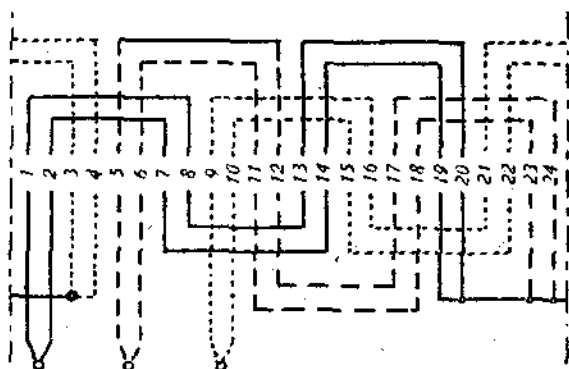
II. ОБМОТКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

В качестве обмоток для статоров асинхронных двигателей могут применяться и обычные обмотки постоянного тока (конечно, без коллектора). Так, если взять многополюсную последовательную обмотку и подвести трехфазный ток в трех точках, отстоящих друг от друга на одинаковое число проводов, в порядке их последовательного соединения, то мы получим трехфазную обмотку, соединенную в треугольник. Вообще для обмотки постоянного тока с $2a$ параллельными ветвями число точек присоединения будет am' , где m' — число зажимов сети переменного тока. От этих мест присоединения ведут, однако, по a путей к одному общему зажиму, образуя в каждой фазе a параллельных ветвей.

Если расстояние между двумя проводами принять за единицу, то полюсное деление выразится числом

$$\tau = \frac{z}{2p}, \quad (43)$$

где z — число проводников обмотки.



Фиг. 42.

При волновой обмотке, при переходе от одного полюса к другому, мы проходим два проводника; при этом получается смещение в магнитном поле на

$$2\tau - 2y = 2\tau - 2 \frac{z+2}{2p} = \pm \frac{2}{p}, \quad (44)$$

где y — результирующий шаг обмотки, равный $\frac{z+2}{2p}$.

В каждой фазе имеется $\frac{1}{2} \cdot \frac{z}{3}$ пар проводов; поэтому, если мы обойдем провода одной фазы, то смещение будет равно

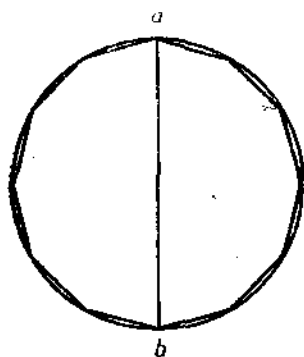
$$\pm \frac{2}{p} \cdot \frac{z}{2 \cdot 3} = \pm \frac{2}{3} \cdot \frac{z}{2p} = \pm \frac{2}{3} \tau, \quad (45)$$

Таким образом, мы видим, что трехфазная многополюсная обмотка может быть упрощена гладкой обмотке, с расположенными рядом проводами, при чем провода на протяжении $\frac{2}{3}$ полюсного деления принадлежат к одной фазе.

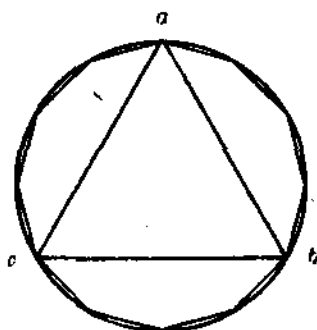
Применяя те же рассуждения к шестифазной обмотке ($m' = 6$), мы найдем, что смещение будет равно $\frac{1}{3} \tau$, т.е. получим аналогию с гладкой обмоткой, при которой провода на протяжении $\frac{1}{3}$ полюсного деления принадлежат к одной фазе.

Если число полюсов и число фаз имеют общие множители, то обмотку нельзя выполнить симметричной, т.е. с одинаковым числом проводников в каждой фазе, так как при этом не получается целого числа для результирующего шага.

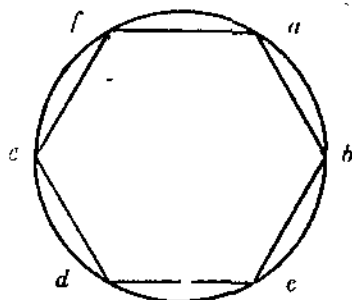
Обмотка постоянного тока может быть представлена в виде многоугольника (потенциальный многоугольник), стороны которого по величине и направлению изображают ЭДС, наводимые в отдельных проводах. При большом числе проводов многоугольник практически не будет отличаться от окружности. На фиг. 43, 44 и 45 изображены многоугольники для обмоток: однофазной ($m' = 2$), трехфазной ($m' = 3$) и шестифазной ($m' = 6$). Диаметр ab (для однофазной обмотки, фиг. 43) и хорды ab, bc, ca (для трехфазной обмотки, фиг. 44) и ab, bc, cd, de, ef и fa (для шестифазной обмотки, фиг. 45) — представляют собой суммарные ЭДС, действующие между зажимами обмотки. Как видно из чертежей, эти ЭДС представляют собой геометрические суммы ЭДС отдельных проводников. Отсюда ясно, что обмотка использована тем лучше, чем больше число подводющих зажимов. Мерой



Фиг. 43.



Фиг. 44.



Фиг. 45.

этого использования, как мы уже знаем, является обмоточный коэффициент, равный отношению суммарной ЭДС к алгебраической сумме ЭДС отдельных проводников (или равный отношению хорды к охватываемой ею дуге), т.е. величина

$$f_{m'} = \frac{2 \sin \frac{\pi}{m'}}{\frac{2\pi}{m'}} = \frac{m'}{\pi} \sin \frac{\pi}{m'} \dots \dots \dots (46)$$

Таким образом:

для однофазной обмотки ($m' = 2$)

$$f_{II} = \frac{2}{\pi} = 0,637, \dots \dots \dots (47)$$

для трехфазной обмотки ($m' = 3$)

$$f_{III} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0,826, \dots \dots \dots (48)$$

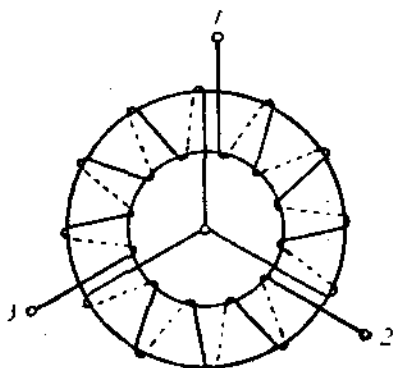
для шестифазной обмотки ($m' = 6$)

$$f_{VI} = \frac{3}{\pi} = 0,955 \dots \dots \dots (49)$$

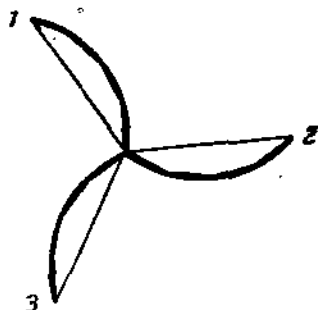
Обмотки постоянного тока могут быть также разрезаны в точках присоединения (такие обмотки, носящие название разрезных, главным образом и применяются). В этом случае фазы соединяются в звезду, как показано для трехфазной, разрезан-

ной в трех местах, обмотки на фиг. 46. Фиг. 46а дает потенциальную диаграмму этой обмотки. Обмоточный коэффициент такой обмотки будет, конечно, одинаковым с обмоткой фиг. 44 ($f_{III} = 0,826$).

Если обмотку постоянного тока разрезать в шести местах, то мы получим по два отрезка, имеющих одну и ту же фазу, и можем соединить эти отрезки так,

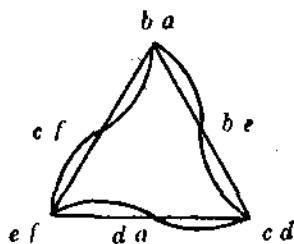


Фиг. 46.

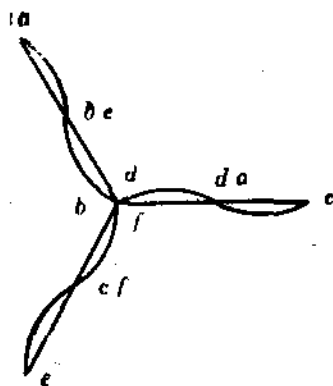


Фиг. 46а.

чтобы получить трехфазную обмотку ($m = 3$ и $m' = 6$). Делается это с той целью, чтобы получить более высокий обмоточный коэффициент, т.е. лучшее использование обмотки. Различные соединения такой в шести местах разрезанной обмотки в трехфазную показаны на фиг. 47 (треугольник) и 47а (звезда). При этом использо-



Фиг. 47.



Фиг. 47а.

вание (обмоточный коэффициент) будет таким же, как для шестифазной неразрезанной обмотки, т.е. $f_{VI} = 0,955$. Практически, мы получаем здесь экономию в меди почти на 25%.

В. Роторные обмотки.

а) Обмотки переменного тока.

Для роторов асинхронных двигателей могут быть применены все рассмотренные до сих пор статорные обмотки. Число впадин на полюс и фазу берут здесь также целым числом, равным обычно

$$q_2 = 2 - 10.$$

Что касается величины обмоточного коэффициента, то величину его можно определять по тем же формулам и таблицам, которые были приведены в гл. II, 2, А, а. Так как в большинстве случаев число витков ротора подбирают такими, чтобы его сила тока была больше силы тока в статоре, то чаще всего встречаются стержневые роторные обмотки и, притом, с двухслойным расположением стержней, т.е. в этом случае в каждой впадине лежат два стержня один над другим.

Нормальной стержневой роторной обмоткой является волновая обмотка с целым числом впадин на полюс и фазу, которая в своем техническом выполнении совпадает с обычной обмоткой постоянного тока.

Если полное число роторных впадин будет u_2 , то можно написать, что

$$u_2 = 2p \cdot m \cdot q_2 \quad \text{и} \quad q_2 = \frac{u_2}{2p \cdot m}.$$

Первый частичный шаг (на стороне, противоположной кольцам) y_1 приблизительно равен полюсному делению, т.е.

$$y_1 = \frac{u_2}{2p} = m \cdot q_2.$$

Так как обычно $m = 3^1$, то

$$y_1 = 3q_2,$$

т.е. стержень 1 верхнего слоя соединяется на задней стороне со стержнем $3q_2 + 1$ нижнего слоя.

Второй частичный шаг приблизительно равен первому

$$y_2 = y_1,$$

т.е. нижний стержень $3q_2 + 1$ соединяется на передней стороне с верхним стержнем

$$(3q_2 + 1) + 3q_2 = 6q_2 + 1.$$

Пример. Четырехполюсный ротор имеет $u_2 = 48$, $q_2 = 4$, $y_1 = y_2 = 3q_2 = 12$. Верхний стержень 1 соединяется на задней стороне с нижним стержнем 13, который в свою очередь соединяется на передней стороне с верхним стержнем 25 и т. д. Условимся обозначать такое соединение следующим образом

$$1_{\text{н}} \xrightarrow{\text{задн. ст.}} 13_{\text{н}} \xrightarrow{\text{передн. ст.}} 25_{\text{н}} \xrightarrow{\text{задн. ст.}} 37_{\text{н}}$$

или

$$1_{\text{н}} \xrightarrow{\text{з.}} 13_{\text{н}} \xrightarrow{\text{п.}} 25_{\text{н}} \xrightarrow{\text{з.}} 37_{\text{н}}.$$

Так как $u_2 = 6p \cdot q_2$, то в случае, если бы всегда $y_1 = y_2 = \frac{u_2}{2p}$, обмотка после обхода $2p$ стержней замкнулась бы, т.е. мы снова пришли бы к верхнему стержню 1.

Поэтому после одного обхода всей окружности ротора второй частичный шаг должен быть увеличен или уменьшен на 1. В нашем примере мы должны, следовательно, от стержня $37_{\text{н}}$ перейти к $2_{\text{н}}$ или $48_{\text{н}}$. Тогда мы получим две схемы: обмотка с удлинением перехода

$$1_{\text{н}} \xrightarrow{\text{з.}} 13_{\text{н}} \xrightarrow{\text{п.}} 25_{\text{н}} \xrightarrow{\text{з.}} 37_{\text{н}} \xrightarrow{\text{п.}} 2_{\text{н}},$$

обмотка с укорочением перехода

$$1_{\text{н}} \xrightarrow{\text{з.}} 13_{\text{н}} \xrightarrow{\text{п.}} 25_{\text{н}} \xrightarrow{\text{з.}} 37_{\text{н}} \xrightarrow{\text{п.}} 48_{\text{н}}.$$

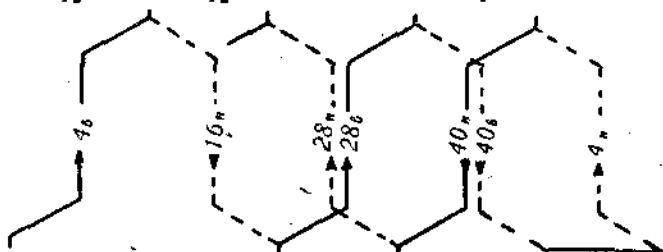
¹⁾ Для однофазных двигателей также берут многофазные (чаще всего трехфазные) обмотки.

Рассмотрим сперва обмотку с удлинением перехода, как наиболее часто встречающуюся.

После q_2 -кратного обхода поверхности ротора, мы соединим верхние стержни $1, 2, \dots, q_2$ и нижние стержни $3q_2 + 1, 3q_2 + 2, \dots, 4q_2$. В нашем примере будут соединены верхние стержни 1, 2, 3, 4, нижние стержни 13, 14, 15, 16, верхние стержни 25, 26, 27, 28 и, наконец, нижние стержни 37, 38, 39, 40, или схематически

$$\begin{array}{l} 1_v \xrightarrow{3.} 13_n \xrightarrow{п.} 25_v \xrightarrow{3.} 37_n \xrightarrow{п.} 2_v \\ 2_v \xrightarrow{3.} 14_n \xrightarrow{п.} 26_v \xrightarrow{3.} 38_n \xrightarrow{п.} 3_v \\ 3_v \xrightarrow{3.} 15_n \xrightarrow{п.} 27_v \xrightarrow{3.} 39_n \xrightarrow{п.} 4_v \\ 4_v \xrightarrow{3.} 16_n \xrightarrow{п.} 28_v \xrightarrow{3.} 40_n \end{array}$$

Если продолжить обматывание в том же порядке, то мы, во-первых, пришли бы к стержню 5 (или вообще говоря к стержню $q_2 + 1$), принадлежащему к другой фазе, а во-вторых, половина стержней первой фазы осталась бы несоединенной. Как видно из предыдущего, во впадинах от 1 до q_2 использованы лишь верхние, а во впадинах от $3q_2 + 1$ до $4q_2$ — лишь нижние стержни.



Фиг. 48.

Для того чтобы ввести в обмотку неиспользованные стержни, применяют так называемые поворотные соединения. Такое соединение, как правило, соединяет два нижних (в исключительных случаях — также два верхних) стержня (так называемых соединительных стержня), благодаря чему еще неиспользованные стержни рассматриваемой фазы соединяются в обратной последовательности. Если в нашем примере ввести поворотное соединение $40_n \xrightarrow{п.} 4_v$ (Фиг. 48) то мы получим следующую схему обмотки одной фазы

$$\begin{array}{l} 1_v \xrightarrow{3.} 13_n \xrightarrow{п.} 25_v \xrightarrow{3.} 37_n \xrightarrow{п.} 2_v \\ 2_v \xrightarrow{3.} 14_n \xrightarrow{п.} 26_v \xrightarrow{3.} 38_n \xrightarrow{п.} 3_v \\ 3_v \xrightarrow{3.} 15_n \xrightarrow{п.} 27_v \xrightarrow{3.} 39_n \xrightarrow{п.} 4_v \\ 4_v \xrightarrow{3.} 16_n \xrightarrow{п.} 28_v \xrightarrow{3.} 40_n \xrightarrow{п.} 4_v \\ 4_n \xrightarrow{3.} 40_n \xrightarrow{п.} 28_n \xrightarrow{3.} 16_v \xrightarrow{п.} 3_n \\ 3_n \xrightarrow{3.} 39_v \xrightarrow{п.} 27_n \xrightarrow{3.} 15_v \xrightarrow{п.} 2_v \\ 2_n \xrightarrow{3.} 38_v \xrightarrow{п.} 26_n \xrightarrow{3.} 14_v \xrightarrow{п.} 1_n \\ 1_n \xrightarrow{3.} 37_v \xrightarrow{п.} 25_n \xrightarrow{3.} 13_v \text{ конец,} \end{array}$$

Соединительные стержни мы будем всегда подчеркивать чертой. Особенно важными стержнями этой обмотки будут:

$1_{\text{в}}$ — начало обмотки
 $13_{\text{в}}$ — конец „
 $40_{\text{в}} — 4_{\text{н}}$ — поворотное соединение.

Начало второй фазы будет отстоять от начала первой фазы на $2q_2$ стержней, т.е. будет совпадать со стержнем $9_{\text{в}}$; началом третьей фазы будет стержень $9 + 2q_2 = 17_{\text{в}}$. Смещение начала фазы на одно или несколько двойных полюсных делений не изменяет распределения тока. Двойное полюсное деление соответствует $2mq_2 = 6q_2$ впадинам. Таким образом, в нашем примере мы можем переместить начало второй фазы из впадины 9 во впадину $9 + 6 \cdot 4 = 33$. В этом случае начала фаз будут лежать во впадинах 1, 33, 17. Такое расположение имеет преимущество симметрии, так как при 48 впадинах, впадины 1, 17 и 33 сдвинуты одна относительно другой точно на $\frac{1}{3}$ окружности. Так как при этом поворотные соединения и концы фаз также будут равномерно распределены по окружности, то балансировка ротора будет полной.

Для второй и третьей фазы мы можем легко составить схему соединений, подобную приведенной выше для первой фазы, и тогда обмотка нашего примера может быть вполне охарактеризована следующими данными

$$u_2 = 48, 2p = 4, m = 3.$$

Шаг	$1_{\text{в}}$	$\frac{3.}{-}$	$13_{\text{н}}$	$\frac{\text{п.}}{-}$	$25_{\text{в}}$
Фазы	I		II		III
Начала	$1_{\text{в}}$		$33_{\text{в}}$		$17_{\text{в}}$
Концы	$13_{\text{в}}$		$45_{\text{в}}$		$29_{\text{в}}$
Поворотные соединения . .	$40_{\text{н}} — 4_{\text{н}}$		$24_{\text{н}} — 36_{\text{н}}$		$8_{\text{н}} — 20_{\text{н}}$

Подобным же образом может быть составлена схема обмотки и для других чисел полюсов и q_2 .

Пример:

$$2p = 6, u_2 = 72, q_2 = 4$$

$$y_1 = y_2 = 3q_2 = 12.$$

Тогда схема первой фазы будет

$1_{\text{в}}$	$\frac{3.}{-}$	$13_{\text{н}}$	$\frac{\text{п.}}{-}$	$25_{\text{в}}$	$\frac{3.}{-}$	$37_{\text{н}}$	$\frac{\text{п.}}{-}$	$49_{\text{в}}$	$\frac{3.}{-}$	$61_{\text{н}}$	$\frac{\text{п.}}{-}$	$2_{\text{в}}$
$2_{\text{в}}$	—											$3_{\text{в}}$
$3_{\text{в}}$	—											$4_{\text{в}}$
$4_{\text{в}}$	—	$16_{\text{н}}$	—	$28_{\text{н}}$	—	$40_{\text{н}}$	—	$52_{\text{в}}$	—	$64_{\text{н}}$	—	$4_{\text{н}}$
$4_{\text{н}}$	$\frac{3.}{-}$	$64_{\text{в}}$	$\frac{\text{п.}}{-}$	$52_{\text{н}}$	$\frac{3.}{-}$	$40_{\text{в}}$	$\frac{\text{п.}}{-}$	$28_{\text{н}}$	$\frac{3.}{-}$	$16_{\text{н}}$	$\frac{\text{п.}}{-}$	$3_{\text{н}}$
$3_{\text{н}}$	—											$2_{\text{н}}$
$2_{\text{н}}$	—											$1_{\text{н}}$
$1_{\text{н}}$	—	$61_{\text{в}}$	—	$49_{\text{в}}$	—	$37_{\text{в}}$	—	$25_{\text{н}}$	—	$13_{\text{в}}$		

Началом второй фазы будет $2q_2 + 1 = 9$, или $9 + 6q_2 = 33$, или $33 + 6q_2 = 57$ и т. д.

Началом третьей фазы будет $4q_2 + 1 = 17$, или $17 + 2 \cdot 6q_2 = 65$, или $65 + 2 \cdot 6q_2 = 41$ и т. д. В данном случае будет целесообразно выбрать для второй

фазы значение 33 и для третьей значение 65, так как при этом получается более равномерное распределение соединений по окружности ротора.

Характеристика обмотки будет

$$u_2 = 72, \quad 2p = 6, \quad m = 3.$$

Шаг	$1_n \xrightarrow{3} 13_n \xrightarrow{n} 25_n$		
Фазы	I	II	III
Начала	1_n	33_n	65_n
Концы	13_n	45_n	5_n
Поворотные соединения	$64_n - 4_n$	$24_n - 36_n$	$56_n - 68_n$

В этой обмотке, как и вообще во всех обмотках с числом пар полюсов, кратным 3, нельзя расположить обмотку так, чтобы начала фаз были абсолютно равномерно распределены по окружности ¹⁾.

Таким образом, обмотка с удлинением перехода может быть охарактеризована следующими формулами

$$\begin{aligned} u_1 &= 3q_2 \\ v_2 &= 3q_2 \text{ до } 3q_2 + 1 \end{aligned}$$

Шаг	$1_n \xrightarrow{3} (3q_2 + 1)_n \xrightarrow{n} (6q_2 + 1)_n$	
Начала фаз . . .	1_n	$[1 + q_2(2 + 6A)]_n$
Концы	$(3q_2 + 1)_n$	$[1 + q_2(5 + 6A)]_n$
Поворотн. соединения .	$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(u_2 - 2q_2)_n - (q_2)_n}{[2q_2(1 + 6A)]_n - [q_2(5 + 12A)]_n} \end{array} \right.$	

. . . (50)

Здесь A — любое целое число, могущее также быть равным и 0.

В конце книги (приложение I) приведены уже вычисленные таблицы характеристик для обмоток с различными $2p$ и q_2 , при чем указаны наиболее равномерные распределения соединений вдоль окружностей ротора.

Для рассмотрения обмотки с укорочением перехода возвратимся к нашему первоначальному примеру, при чем теперь, после одного обхода, второй частичный шаг будем уменьшать на 1. Тогда мы получим для первой фазы следующую схему

$$\begin{array}{ccccccc} 1_n & \xrightarrow{3} & 13_n & \xrightarrow{n} & 25_n & \xrightarrow{3} & 37_n \xrightarrow{n} 48_n \\ 48_n & \text{---} & 12_n & \text{---} & 24_n & \text{---} & 36_n \text{---} 47_n \\ 47_n & \text{---} & 11_n & \text{---} & 23_n & \text{---} & 35_n \text{---} 46_n \\ 46_n & \text{---} & 10_n & \text{---} & 22_n & \text{---} & 34_n \text{---} 45_n \\ 45_n & \text{---} & 9_n & \text{---} & 21_n & \text{---} & 33_n \text{---} 44_n \\ 44_n & \text{---} & 8_n & \text{---} & 20_n & \text{---} & 32_n \text{---} 43_n \\ 43_n & \text{---} & 7_n & \text{---} & 19_n & \text{---} & 31_n \text{---} 42_n \\ 42_n & \text{---} & 6_n & \text{---} & 18_n & \text{---} & 30_n \text{---} 41_n \\ 41_n & \text{---} & 5_n & \text{---} & 17_n & \text{---} & 29_n \text{---} 40_n \\ 40_n & \text{---} & 4_n & \text{---} & 16_n & \text{---} & 28_n \text{---} 39_n \\ 39_n & \text{---} & 3_n & \text{---} & 15_n & \text{---} & 27_n \text{---} 38_n \\ 38_n & \text{---} & 2_n & \text{---} & 14_n & \text{---} & 26_n \text{---} 37_n \\ 37_n & \text{---} & 1_n & \text{---} & 13_n & \text{---} & 25_n \text{---} 36_n \\ 36_n & \text{---} & 0_n & \text{---} & 12_n & \text{---} & 24_n \text{---} 35_n \\ 35_n & \text{---} & 31_n & \text{---} & 11_n & \text{---} & 23_n \text{---} 34_n \\ 34_n & \text{---} & 30_n & \text{---} & 10_n & \text{---} & 22_n \text{---} 33_n \\ 33_n & \text{---} & 29_n & \text{---} & 9_n & \text{---} & 21_n \text{---} 32_n \\ 32_n & \text{---} & 28_n & \text{---} & 8_n & \text{---} & 20_n \text{---} 31_n \\ 31_n & \text{---} & 27_n & \text{---} & 7_n & \text{---} & 19_n \text{---} 30_n \\ 30_n & \text{---} & 26_n & \text{---} & 6_n & \text{---} & 18_n \text{---} 29_n \\ 29_n & \text{---} & 25_n & \text{---} & 5_n & \text{---} & 17_n \text{---} 28_n \\ 28_n & \text{---} & 24_n & \text{---} & 4_n & \text{---} & 16_n \text{---} 27_n \\ 27_n & \text{---} & 23_n & \text{---} & 3_n & \text{---} & 15_n \text{---} 26_n \\ 26_n & \text{---} & 22_n & \text{---} & 2_n & \text{---} & 14_n \text{---} 25_n \\ 25_n & \text{---} & 21_n & \text{---} & 1_n & \text{---} & 13_n \text{---} 24_n \\ 24_n & \text{---} & 20_n & \text{---} & 0_n & \text{---} & 12_n \text{---} 23_n \\ 23_n & \text{---} & 19_n & \text{---} & 31_n & \text{---} & 11_n \text{---} 22_n \\ 22_n & \text{---} & 18_n & \text{---} & 30_n & \text{---} & 10_n \text{---} 21_n \\ 21_n & \text{---} & 17_n & \text{---} & 29_n & \text{---} & 9_n \text{---} 20_n \\ 20_n & \text{---} & 16_n & \text{---} & 28_n & \text{---} & 8_n \text{---} 19_n \\ 19_n & \text{---} & 15_n & \text{---} & 27_n & \text{---} & 7_n \text{---} 18_n \\ 18_n & \text{---} & 14_n & \text{---} & 26_n & \text{---} & 6_n \text{---} 17_n \\ 17_n & \text{---} & 13_n & \text{---} & 25_n & \text{---} & 5_n \text{---} 16_n \\ 16_n & \text{---} & 12_n & \text{---} & 24_n & \text{---} & 4_n \text{---} 15_n \\ 15_n & \text{---} & 11_n & \text{---} & 23_n & \text{---} & 3_n \text{---} 14_n \\ 14_n & \text{---} & 10_n & \text{---} & 22_n & \text{---} & 2_n \text{---} 13_n \\ 13_n & \text{---} & 9_n & \text{---} & 21_n & \text{---} & 1_n \text{---} 12_n \\ 12_n & \text{---} & 8_n & \text{---} & 20_n & \text{---} & 0_n \text{---} 11_n \\ 11_n & \text{---} & 7_n & \text{---} & 19_n & \text{---} & 31_n \text{---} 10_n \\ 10_n & \text{---} & 6_n & \text{---} & 18_n & \text{---} & 30_n \text{---} 9_n \\ 9_n & \text{---} & 5_n & \text{---} & 17_n & \text{---} & 29_n \text{---} 8_n \\ 8_n & \text{---} & 4_n & \text{---} & 16_n & \text{---} & 28_n \text{---} 7_n \\ 7_n & \text{---} & 3_n & \text{---} & 15_n & \text{---} & 27_n \text{---} 6_n \\ 6_n & \text{---} & 2_n & \text{---} & 14_n & \text{---} & 26_n \text{---} 5_n \\ 5_n & \text{---} & 1_n & \text{---} & 13_n & \text{---} & 25_n \text{---} 4_n \\ 4_n & \text{---} & 0_n & \text{---} & 12_n & \text{---} & 24_n \text{---} 3_n \\ 3_n & \text{---} & 31_n & \text{---} & 11_n & \text{---} & 23_n \text{---} 2_n \\ 2_n & \text{---} & 30_n & \text{---} & 10_n & \text{---} & 22_n \text{---} 1_n \\ 1_n & \text{---} & 29_n & \text{---} & 9_n & \text{---} & 21_n \text{---} 0_n \end{array}$$

Отсюда мы видим, что по сравнению с обмоткой с удлинением перехода здесь изменилось положение поворотного соединения.

¹⁾ Обоснование этого см. R. Richter — Ankerwicklungen.

Характеристика обмотки будет теперь

Фазы	I	II	III
Начала	1 _н	33 _н	17 _н
Концы	13 _н	45 _н	29 _н
Поворотн. соединения . .	<u>34_н — 46_н</u>	<u>18_н — 30_н</u>	<u>2_н — 14_н</u>
Шаг	1 _н — ^{3.} 13 _н — ^{п.} 25 _н		

В то время как в обмотках с удлинением перехода y_2 колебался между $3q_2$ и $3q_2 + 1$, здесь он колеблется от $3q_2$ до $3q_2 - 1$.

Так как при ремонте двигателей стержни, если они не пронумерованы, могут быть легко перепутаны и может оказаться, что для шага $3q_2 + 1$ длина соответствующего стержня будет недостаточной, то рекомендуется при проектировании новых двигателей устраивать всегда обмотку с удлинением перехода, чтобы при ремонте, сократив в случае надобности y_2 до $3q_2 - 1$, перейти на обмотку с укорочением перехода. Во всем же остальном обе схемы совершенно равноценны.

Общими формулами для обмотки с укорочением перехода будут

$$\left. \begin{aligned}
 & y_2 = 3q_2 \\
 & v_2 = 3q_2 \text{ до } 3q_2 - 1. \\
 \text{Шаг} \dots\dots\dots & 1, \frac{3.}{(3q_2 + 1)_н} \frac{п.}{(6q_2 + 1)_н} \\
 \text{Начала} \dots\dots\dots & 1, [1 + q_2(2 + 6A)]_н, [1 + 2q_2(2 + 6A)]_н \\
 \text{Концы} \dots\dots\dots & (3q_2 + 1)_н, [1 + q_2(5 + 6A)]_н, [1 + q_2(7 + 12A)]_н \\
 \text{Поворотн. соединения} \dots\dots\dots & \left\{ \frac{(u_2 - 4q_2 + 2)_н - (u_2 - q_2 + 2)_н}{[u_2 + 2 - q_2(2 - 6A)]_н - [2 + q_2(1 + 6A)]_н}, \right. \\
 & \left. \frac{(2 + q_2 \cdot 12A)_н - [2 + q_2(3 + 12A)]_н}{[1 + q_2(5 + 6A)]_н - [1 + q_2(7 + 12A)]_н} \right\} \quad (51)
 \end{aligned} \right\}$$

В таблице II (в конце книги) приведены вычисленные по этим формулам значения для различных $2p$ и q_2 .

Кроме этих „нормальных“ обмоток, у которых число впадин на полюс и фазу представляет собой целое число, иногда (хотя сравнительно редко) встречаются обмотки с дробным шагом впадин на полюс и фазу. Интересующихся этими обмотками отсылаем к книге проф. Richter'a, Ankerwicklungen.

Чтобы облегчить проектирование обмоток, в конце книги приведены таблицы, в которых собраны все данные для обмоток с удлинением и укорочением перехода для наиболее часто встречающихся типов машин. Пользование этими таблицами после усвоения всего вышесказанного не может вызвать никаких затруднений.

б) Обмотки постоянного тока.

Для роторов чаще всего применяются разрезные обмотки, свойства которых рассмотрены в гл. II, А, II. Число впадин на полюс и фазу в этих обмотках также обычно бывает дробным числом.

в) Короткозамкнутые обмотки.

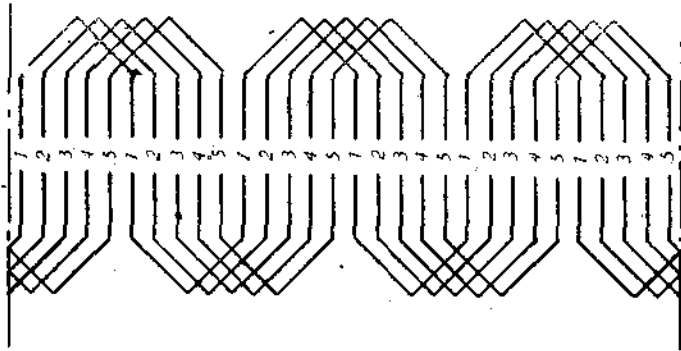
В качестве короткозамкнутых обмоток для роторов асинхронных двигателей употребляются многофазные короткозамкнутые обмотки и обмотки в виде беличьего колеса. Все рассмотренные нами до сих пор трехфазные обмотки могут применяться как короткозамкнутые, однако, обычно употребляются обмотки с большим числом

фаз, чем три. На фиг. 49 изображена пятифазная, шестиполюсная однослойная обмотки. Результирующий шаг

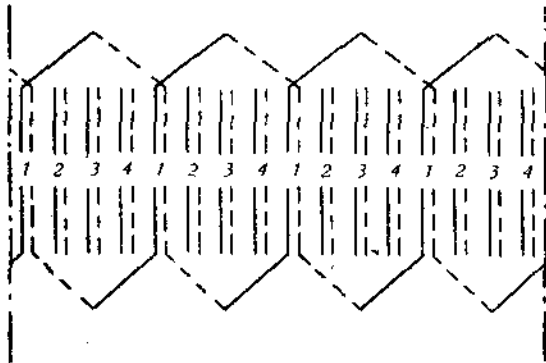
$$y = y_1 + y_2 = \frac{s}{p},$$

где s — число стержней обмотки. Чтобы получить симметричное распределение лобовых соединений, число фаз должно быть нечетным.

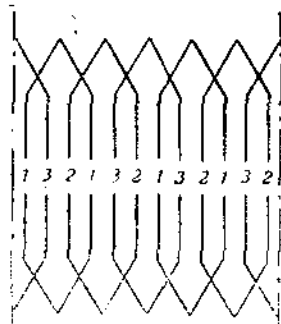
Если выполнить обмотку в два слоя, то получится схема, изображенная на фиг. 50. В этом случае симметричное распределение лобовых соединений получается



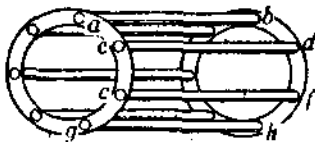
[Фиг. 49.



Фиг. 50.



Фиг. 51.



Фиг. 52.



Фиг. 53.

при всяком числе фаз (изображенная на фиг. 50) обмотка намотана на четыре фазы при четырех полюсах).

Здесь для ясности вычерчена лишь одна фаза, при чем проводники верхнего слоя показаны сплошной линией, а проводники нижнего слоя — пунктиром.

На фиг. 51 представлена четырехполюсная трехфазная обмотка, в которой каждые два стержня, лежащие на расстоянии полюсного деления, соединены в замкнутую рамку.

Наиболее простыми короткозамкнутыми обмотками являются обмотки в виде беличьего колеса. Устройство такой обмотки показано на фиг. 52. Здесь все передние и все задние концы стержней коротко замкнуты двумя медными кольцами. Если

разрезать кольца обмотки, как показано на фиг. 53, то мы получим короткозамкнутую многофазную обмотку с параллельно включенными фазами. Такое разрезание кольца увеличивает сопротивление и обуславливает больший начальный вращающий момент, но зато скольжение при этом также увеличивается. Все же этот способ рекомендуется, так как дает возможность избежать появления полей высшего порядка.

С. Заключение.

В заключение скажем несколько слов относительно выбора обмоток.

Следует предпочитать обмотки, лобовые соединения которых лежат в двух плоскостях, так как сами соединения занимают при этом меньше места и получаются меньше длинные витков. Фазы следует включать в звезду, так как при соединении треугольником появляются гармоники порядка кратного 3 и, благодаря этому, возникают добавочные токи. При однофазных обмотках начало и конец обмотки должны лежать на одной стороне статора, чтобы избежать кругового намагничивания железа.

Для статоров, как мы уже указывали выше, в случае высоких напряжений применяется катушечная, а в случае низких напряжений и больших токов — стержневая обмотка.

Замкнутая обмотка постоянного тока применяется лишь при соединении треугольником; при звезде обмотку приходится разрезать.

Для роторов, снабженных кольцами, иногда применяют разрезанную на шесть частей обмотку постоянного тока, но чаще устраивают двухслойную стержневую обмотку, с целым числом впадин на полюс и фазу и двумя стержнями во впадине. Соединение фаз и число впадин при этом должно быть выбрано так, чтобы получить наиболее выгодное в конструктивном отношении напряжение между кольцами. Впрочем, у малых моторов (до 5 kW), несмотря на последовательное соединение стержней и расположение фаз звездой, могут получиться настолько большие токи в кольцах, что придется и здесь применить катушечную обмотку. Обмотки постоянного тока применяются для роторов часто тогда, когда желательно получить число впадин, которое не имело бы общего делителя с числом впадин статора.

Для короткозамкнутых роторов применяются обмотки многофазные и клеточные.

3. Впадины и их изоляция.

Остов статора и ротора асинхронных двигателей собирается из железных листов, толщиной 0,5 *mm* (иногда 0,35 *mm*), изолированных друг от друга, во избежание больших потерь на гистерезис и токи Фуко, прослойками из тонкой бумаги (наклеенной на железо) или слоем изолирующего лака.

Впадины выштамповываются в отдельных железных листах. Для малых моторов статорные и роторные впадины выштамповываются в одном листе и затем роторная часть вырезывается¹⁾.

Как известно, впадины бывают трех типов: открытые, полузакрытые и закрытые.

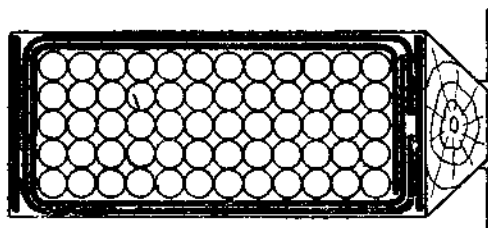
Открытые впадины удобны тем, что допускают предварительное изготовление обмотки на шаблоне, благодаря чему изоляция становится более надежной и стоимость обмотки уменьшается. Однако, с другой стороны, распределение силовых линий вдоль воздушного промежутка становится при этом настолько неравномерным, что намагничивающий ток сильно возрастает, что для асинхронных двигателей представляет существенный недостаток.

Совершенно закрытые впадины хотя и дают вполне равномерное поле в воздушном промежутке, зато весьма увеличивают рассеяние.

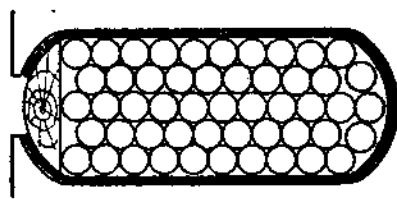
Поэтому для асинхронных двигателей в настоящее время применяются почти исключительно полузакрытые впадины, изображенные на фиг. 54, 55 и 56. Здесь,

¹⁾ На компаунд-прессах это производится одновременно.

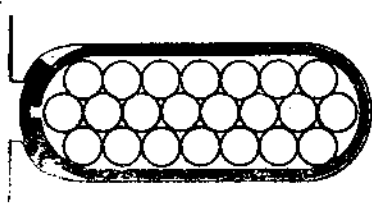
благодаря наличию зазора между зубцами, рассеяние практически будет таким же, как и при открытых впадинах, а с другой стороны, при величине зазора от 2 до 5 *mm*, распределение силовых линий в воздушном промежутке будет почти равномерным. Толщина выступа возле зазора обычно составляет 0,5 *mm*. Однако, как мы указывали, при таких впадинах трудно получить крепкую, хорошо изолированную обмотку, что имеет большое значение, в особенности при высоковольтных машинах. Поэтому иногда применяют открытые впадины с клиньями из магнитного материала. Чтобы избежать при этом короткого замыкания отдельных листов статора между собой, клинья должны быть от них изолированы. Фирма Siemens-Schuckert ¹⁾ применяет для



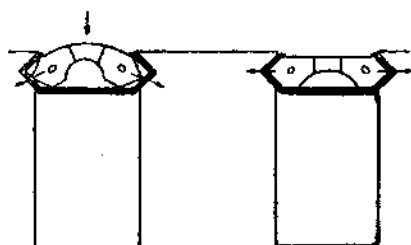
Фиг. 54.



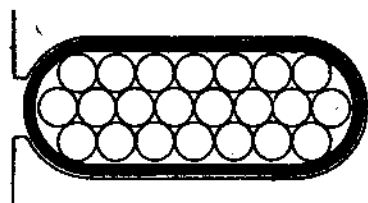
Фиг. 55.



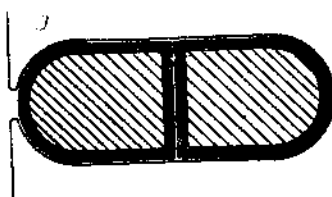
Фиг. 56.



Фиг. 57.



Фиг. 58.



Фиг. 59.

этой цели клинья, сделанные из железных пластинок, соединенных стержнями из немагнитного материала в одно целое. Пластины устроены шарнирными (фиг. 57) и укрепляются во впадине с помощью молотка. Благодаря тому, что изоляция между клином и впадиной только сдавливается, а не срывается, как при клиньях других систем, она может быть взята очень тонкой, и магнитное сопротивление между клином и впадиной будет незначительным. Кроме того эти клинья придают значительную прочность зубцам.

Следует еще указать, что с точки зрения уменьшения рассеяния отношение глубины впадины к ее ширине не должно быть слишком большим. Это отношение без особенной нужды не следует брать больше 4.

Изолирование обмотки от стенок впадины может происходить тремя способами:

1. Впадина выкладывается изолирующим материалом, затем в нее кладется обмотка, прокладка закрывается и загоняется клин. Такой способ применяется при катушечной обмотке и полузакрытых впадинах, как это видно из фиг. 54.

¹⁾ См. Siemens-Zeitschrift, 1921, стр. 192, статья M. J. Iig.

2. Во впадину сбоку вкладывается трубка из изолирующего материала и затем впадина „прошивается“ проволоочной обмоткой (фиг. 58), или в нее закладываются стержни. Применяется для моторов высокого напряжения и при стержневой обмотке, а также для закрытых впадин.

3. Катушки приготавливаются на шаблоне, там же изолируются и готовыми закладываются во впадину. Применяется для открытых впадин, типа фиг. 57.

На фиг. 59 показана впадина для роторной, двухслойной стержневой обмотки, с профилированными для экономии места стержнями.

Толщина изоляции впадины определяется напряжением машины, хотя для низких напряжений (до 500 V) здесь больше играют роль механические свойства.

Для машин до 500 V изоляция впадины состоит из прессишпана толщиной от 0,3 до 1 *mm*. На фиг. 54 впадина изолирована двумя слоями прессишпана толщиной по 0,4 *mm* каждая, так что общая толщина изоляции достигает здесь 0,8 *mm*. Для определения толщины изоляции до 500 V можно пользоваться эмпирической формулой Ossanna.

$$a_n = 0,4 + \frac{E}{1000} \text{ mm}, \dots \dots \dots (52)$$

где E — фазовое напряжение обмотки.

Если в одной впадине лежат несколько сторон катушек, то они отделяются друг от друга слоем прессишпана толщиной 0,3—0,5 *mm*. Сверху, под клин, обычно закладывается прессишпановая полоска, толщиной 0,5—1 *mm*. Деревянный клин делается толщиной от 2 до 8 *mm*.

При закругленных впадинах применяют до напряжений в 250 V, лакированную бумагу, толщиной около 0,8 *mm*, и обмотку закрывают сверху или деревянным клином (фиг. 55) или полоской, спрессованной из нескольких слоев лакированной бумаги, толщиной 1—2 *mm* (фиг. 56). Однако, при таком способе готовый статор (или ротор) после изготовления обмотки должен быть погружен целиком в лак (в вакуумсушильной печи), чтобы все зазоры между клином и изоляцией заполнились лаком и не допускали проникновения во впадину сырости или пыли.

При напряжениях свыше 500 V применяют обычно для изолирования впадин закрытые трубки (фиг. 58). Для машин, работающих в сухом помещении, можно до напряжения в 2000 V применять трубки из бумаги толщиной для 1000 V—около 1,2 *mm*, для 2000 V—около 2 *mm*. Начиная с 1000 V для сухих помещений и с 2500 V для сухих применяют миканитовые или слюдяные трубки толщиной (с точки зрения механической прочности) около 2 *mm*. При 6000 V берут трубку толщиной около 3 *mm*, а при 10000—около 3,5 *mm*.

Обмотки роторов изолируются обычно бумажной прослойкой, толщиной для напряжения в 200 V около 0,5 *mm*, а для 600 V—около 1 *mm*.

При овальных впадинах проводники роторной обмотки часто профилируются по форме впадины, как показано на фиг. 59.

Следует еще отметить, что в настоящее время для обмоток высокого напряжения, начиная от 3000 V, воздушные каналы и пространства во впадине должны уничтожаться, так как иначе выделяющийся под влиянием ионизации озон быстро портит изоляцию. Для этой цели высушенные в печи обмотки под вакуумом подвергаются пропитыванию лаком, заполняющим все поры.

Головки обмоток при напряжениях до 500 V обворачиваются пропитанной лаком льняной лентой и затем еще раз обворачиваются вместе. При высоких напряжениях головки обворачиваются миканитом или слюдой. Иногда между головками помещаются еще изолирующие прокладки. Толщину такой двукратной изоляции можно принимать равной около 1 *mm* с каждой стороны.

Минимальное расстояние головок от корпуса и между собой при различных напряжениях может быть взято из приводимой таблицы, где также указаны материал и толщина изоляции впадины.

Напряжение V	Изоляция впа- дины	Расстояние mm
500	Бумага 1 mm	10
1 000	" 1,2 "	15
3 000	Миканит 2 "	25
6 000	Слюда 3 "	30
10 000	" 3,5 "	40

При определении ширины впадины для катушечных обмоток следует предусматривать запас 0,1 — 0,3 mm для облегчения „прошивания“ проводников.

4. Определение величины воздушного промежутка.

Для определения величины воздушного промежутка δ можно воспользоваться несколько измененной автором этой книги формулой Ossanna

$$\delta = 0,02 \left(1 + \frac{\sqrt{0,5 \cdot D \cdot l_i}}{10} \right) \text{ cm} \dots \dots \dots (53)$$

Можно также воспользоваться данными „Нормы союза германских электротехников“¹⁾ и стандартами ОСТ 678 и ОСТ 679, приведенными в гл. I, 5.

Моторы с увеличенным воздушным промежутком строятся для тяжелых приводов, где первую роль играет надежность работы и где поэтому не приходится считаться с уменьшением коэффициента мощности.

Коэффициент полезного действия при увеличенном воздушном промежутке практически не изменяется, уменьшение же $\cos \varphi$ дает следующая таблица.

$\cos \varphi$ для нормального воздушного промежутка	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7
$\cos \varphi$ для увеличенного воздушного промежутка	0,86	0,80	0,73	0,68	0,63
Разность	0,04	0,05	0,07	0,07	0,07

Промежуточные значения могут быть получены путем интерполирования. Определив величину воздушного промежутка, находим диаметр ротора

$$D' = D - 2\delta \dots \dots \dots (54)$$

5. Определение действительной длины статора и ротора.

Теоретическая длина статора и ротора l_i складывается из длины сердечника без воздушных щелей и некоторой добавочной длины, которая учитывает расширение силового потока, благодаря наличию воздушных щелей и боковых поверхностей.

Обычно в статоре и роторе устраивается одинаковое количество воздушных щелей (фиг. 60), для того чтобы ток воздуха, получаемый при вращении ротора, мог также служить и для охлаждения статора.

Число щелей зависит от длины сердечника. Обычно толщину отдельных пакетов делают около 60 — 80 mm. Ширина щелей составляет обычно 0,8 — 1,2 cm.

¹⁾ ETZ, 1922 г., стр. 555 и 556.

Если число воздушных щелей обозначим через b , а ширину одной щели — через L , то длина сердечника без воздушных щелей будет

$$l = bL,$$

где l — полная длина сердечника.

Учитывая по формуле Arnold'a¹⁾ увеличение длины якоря в

$$1,46 (b + 1) \cdot \delta \cdot \lg \left(1 + \frac{\pi L}{2\delta} \right),$$

найдем, что теоретическая длина сердечника

$$l_1 = l - bL + 1,46 (b + 1) \cdot \delta \cdot \lg \left(1 + \frac{\pi L}{2\delta} \right),$$

откуда полная длина сердечника

$$l = l_1 + bL - 1,46 (b + 1) \cdot \delta \cdot \lg \left(1 + \frac{\pi L}{2\delta} \right) \quad (55)$$

Для предварительных подсчетов можно пользоваться приближенной формулой Arnold'a²⁾

$$l = l_1 + \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{2} \right) bL \quad (56)$$

6. Расчет обмотки статора.

Число последовательно соединенных витков одной фазы статора можно определить по формуле

$$w_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot AS}{2 \cdot m_1 \cdot I_1}, \quad (57)$$

где сила тока одной фазы

$$I_1 = \frac{P \cdot 10^3}{E_1 \cdot m_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi}$$

При наличии в каждой фазе a_1 параллельных ветвей сила тока каждой ветви

$$i_1 = \frac{I_1}{a_1}.$$

Выбор числа параллельных ветвей зависит от силы тока I_1 и от типа обмотки.

Вообще число a_1 следует выбирать так, чтобы сила тока i_1 не превосходила величины 150—200 А, так как в противном случае проводники получают слишком большое сечение, что при переменном токе влечет за собой значительное возрастание сопротивления и связанное с этим повышение джаулевых потерь (вследствие skin-effect'a).

Задавшись подходящей плотностью тока Δ_1 (гл. I, 9), можно определить поперечное сечение проводника

$$q_s = \frac{i_1}{\Delta_1} \text{ mm}^2 \quad (58)$$

и по таблице подобрать проволоку или стержни подходящего размера.

¹⁾ Arnold — Wechselstromtechnik, т. V, 1, стр. 41.

²⁾ Loc. cit.

Число последовательно соединенных проводников, приходящихся на 1 впадину, определяется по формуле

$$n_{u_1} = \frac{2w_1}{2p \cdot q_1} = \frac{w_1}{p \cdot q_1} \dots \dots \dots (59)$$

(где q_1 — число впадин на полюс и фазу), если задаться величиной q_1 . При выборе q_1 можно руководствоваться тем, что зубцовый шаг на поверхности статора обычно лежит в пределах от 20 до 40 мм, т.-е.

$$t'_{s \min} = \frac{\pi D}{u_1} = 20 \div 40 \text{ мм}, \dots \dots \dots (60)$$

где u_1 — полное число впадин статора. Тогда

$$q_1 = \frac{\tau}{m_1 \cdot t'_{s \min}} \approx (0,5 \div 0,25) \frac{\tau}{m_1} \dots \dots \dots (61)$$

Задавшись величиной q_1 и подставив ее в уравнение (59), мы обычно не получим для n_{u_1} целого числа. Поэтому число витков w_1 придется несколько изменить, чтобы получить для n_{u_1} ближайшее к найденному целое число. При этом, конечно, несколько изменится и величина AS , которую окончательно определяем из выражения

$$AS = \frac{w_1 \cdot 2 \cdot m_1 \cdot I_1}{\pi D} \dots \dots \dots (62)$$

Если для двигателей с четным числом пар полюсов при нахождении n_{u_1} получится число, близкое к 1,5; 2,5; 3,5 и т. д., то можно в каждую впадину уложить вдвое больше проводов (3, 5, 7...), устроив обмотку из двух параллельных ветвей.

Найденную величину q_1 можно проконтролировать еще и другим путем, исходя из следующих соображений.

Для того чтобы рассеяние не было чрезмерно велико, необходимо, чтобы объем тока во впадине, т.-е. величина

$$A_n = n_{u_1} \cdot I_1, \dots \dots \dots (63)$$

не превосходила определенного значения, достигающего:

- 1) у малых моторов высокого напряжения 300 ÷ 500 А
- 2) у малых моторов низкого напряжения 400 ÷ 700 .
- 3) у больших моторов высокого напряжения . . . 500 ÷ 800 .
- 4) у больших моторов низкого напряжения . . . 600 ÷ 1 000 .

Объем тока во впадине можно еще выразить формулой

$$A_n = \alpha \cdot t'_{s \min} \cdot AS, \dots \dots \dots (64)$$

где α — коэффициент, зависящий от числа заполненных впадин.

Для трехфазных моторов, у которых заполнены все впадины, $\alpha = 1$.

Для однофазных моторов, у которых заполнено $\frac{2}{3}$ всех впадин, $\alpha = 1,5$.

Из (64) следует, что

$$t'_{s \min} = \frac{A_n}{\alpha \cdot AS}$$

Тогда число впадин на полюс и фазу

$$q_1 = \frac{\tau}{m_1 \cdot t'_{s \min}} = \frac{\alpha \cdot \tau \cdot AS}{m_1 \cdot A_n} \dots \dots \dots (65)$$

или

$$A_n = \frac{\alpha \cdot \tau \cdot AS}{m_1 \cdot q_1} \dots \dots \dots (66)$$

Подставляя в (66) найденную величину q_1 , можно видеть, не превышает ли A_n указанных пределов.

Полное число впадин статора

$$u_1 = 2 \cdot m_1 \cdot p \cdot q_1 \quad (67)$$

Зубцовый шаг на поверхности статора

$$t'_{z \min} = \frac{\pi D}{u_1} \quad (68)$$

Для определения размеров впадины проще всего исходить из наименьшей ширины зубца ($Z'_{\min}$). Величина магнитной индукции в наиболее узкой части зубца (на поверхности статора)

$$B'_{z \max} = \frac{t'_{z \min} \cdot l_t \cdot B_l}{Z'_{\min} (l - bL) \cdot 0,9} \quad (69)$$

Коэффициент 0,9 учитывает здесь толщину изоляционных прослоек между железными листами статора.

Из (69) получаем

$$Z'_{\min} = \frac{t'_{z \min} \cdot l_t \cdot B_l}{0,9 (l - bL) \cdot B'_{z \max}} \quad (70)$$

Значения для B_l и $B'_{z \max}$, в зависимости от величины проектируемого двигателя, берутся согласно указаний, сделанных в гл. I, 8.

Таким образом, ширина впадины

$$b_{n_1} \leq t'_{z \min} - Z'_{\min} \quad (71)$$

Зная число проводников во впадине и их сечение, мы можем начертить эскиз их расположения, приняв во внимание всё сказанное в § 3 этой главы.

Как мы уже указывали, с точки зрения рассеяния не следует брать отношение глубины впадины к ее ширине больше 4, т.-е. должно быть

$$\frac{h_{n_1}}{b_{n_1}} \leq 4 \quad (72)$$

Обычно глубина впадины статора лежит в пределах

$$h_{n_1} \approx (4 \div 5) \frac{D-9}{D-4} \text{ см} \quad (73)$$

7. Расчет обмотки ротора.

а) Ротор с фазовой обмоткой (с кольцами).

При расчете обмотки ротора с кольцами число витков одной фазы нужно выбирать так, чтобы максимальное, получающееся при неподвижном роторе напряжение между кольцами не превосходило известной величины как с точки зрения изоляции, так и безопасности для обслуживающего персонала. Это напряжение может быть найдено из соотношения чисел витков одной фазы статора и ротора по формуле

$$E_{r \max} \approx E \frac{w_2}{w_1} \quad (74)$$

где $E_{r \max}$ — максимальное напряжение между двумя кольцами,

E — напряжение питающей мотор сети (напряжение между двумя зажимами статора).

Эта формула справедлива при одинаковом числе фаз статора и ротора и одинаковом их соединении (напр., обе обмотки соединены звездой). Если же статор соединен в треугольник, а ротор в звезду, то

$$E_{r \max} \approx \sqrt{3} \cdot E \cdot \frac{w_2}{w_1} \dots \dots \dots (75)$$

Для моторов малой и средней мощности должно быть

$$E_{r \max} \leq 100 \text{ до } 200 \text{ V.}$$

Для моторов большой мощности при таком напряжении, однако, получались бы слишком большие токи в обмотке и вследствие этого слишком большие сечения для проводников; поэтому здесь иногда приходится брать

$$E_{r \max} = \text{до } 500 - 600 \text{ V.}$$

Число пазов на полюс и фазу для ротора не должно быть то же, что и для статора, чтобы избежать образования сильных местных полей. Обычно

$$q_2 > q_1,$$

так как напряжение ротора меньше, а следовательно и изоляция впадин слабее, чем для статора, и занимает меньше места. Однако, при диаметрах ротора $< 160 \text{ мм}$ почти всегда делают $q_2 < q_1$.

Число витков и число впадин должны быть подобраны так, чтобы число проводников в пазу

$$n_2 = \frac{w_2}{p \cdot q_2} \dots \dots \dots (76)$$

было целым числом.

Предполагая, что общее число ампервитков ротора приблизительно на 10% меньше числа ампервитков статора, определяем ток одной фазы ротора из выражения

$$I_2 = 0,9 \cdot I_1 \frac{f_1 \cdot w_1 \cdot m_1}{f_2 \cdot w_2 \cdot m_2} \text{ — для многофазного двигателя} \dots \dots \dots (77)$$

и

$$I_2 = 0,9 \cdot I_1 \frac{f_1 w_1}{2 f_2 w_2} \text{ — для однофазного двигателя } ^1), \dots \dots \dots (77-a)$$

где m_1 — число фаз статора,

m_2 — число фаз ротора,

f_1 и f_2 — обмоточные коэффициенты статора и ротора.

При a_2 параллельных ветвях одной фазы, ток каждой ветви

$$i_2 = \frac{I_2}{a_2} \dots \dots \dots (78)$$

Задавшись плотностью тока Δ_2 (гл. I, 9), определяем поперечное сечение проводника

$$q_r = \frac{i_2}{\Delta_2} \dots \dots \dots (79)$$

¹⁾ В этой формуле в знаменателе стоит 2, потому, что однофазный двигатель можно представить себе как трехфазный, у которого одна фаза выключена, а две другие соединены последовательно. Поэтому число витков w_1 включает в себе витки двух фаз, а в формулу должно быть подставлено число витков одной фазы, т.е. $\frac{w_1}{2}$.

При определении размеров впадины можно, как и для статора, исходить из максимальной индукции в зубцах, которая здесь будет иметь место у основания зубца

$$B''_{s \max} = \frac{t''_{s \max} \cdot l_t \cdot B_l}{0,9 (l - bL) \cdot Z''_{\min}}, \dots \dots \dots (80)$$

откуда

$$Z''_{\min} = \frac{t''_{s \max} \cdot l_t \cdot B_l}{0,9 (l - bL) \cdot B''_{s \max}} \dots \dots \dots (81)$$

Так как зубцовый шаг по окружности, проходящей через основания зубцов, нам неизвестен, то для определения ширины впадины

$$b_{n_2} = t''_{z \min} - Z''_{\min} \dots \dots \dots (82)$$

приходится задаваться сперва высотой зубца h_{n_2} , затем определять $t''_{z \min}$ и, наконец, $Z''_{\min}$ и b_{n_2} .

Обычно высота зубца ротора

$$h_{n_2} \approx (0,5 \div 0,75) h_{n_1}.$$

С точки зрения механической прочности необходимо соблюдать условие

$$Z''_{\min} \geq 3 \text{ mm.}$$

В остальном поступаем, как при расчете статорной обмотки.

б) Ротор с короткозамкнутой обмоткой.

Для роторов с короткозамкнутыми обмотками число впадин, во избежание появления высших гармонических и так называемых мертвых точек, также не должно быть равно числу впадин статора и, по возможности, не должно даже иметь с ними общий делитель. Обычно наименьшим числом впадин для короткозамкнутых обмоток считают 29. Очень часто также берут на роторе 43 и 53 впадины при числе статорных впадин 36 и 48. Иногда берут u_2 равным 14 p или 26 p или

$$\begin{aligned} u_2 &= u_1 - p \text{ (для четного } p) \\ u_2 &= u_1 - 2p \text{ (для нечетного } p). \end{aligned}$$

Для наиболее простой обмотки, так называемой беличьей клетки, число впадин равно числу проводников, т. е.

$$u_2 = z_2,$$

а число фаз равно числу проводников, приходящемуся на пару полюсов

$$m_2 = \frac{z_2}{p}.$$

У многополюсной машины p таких многофазных систем соединены параллельно. Каждая фаза содержит половину витка и обмоточный коэффициент $f_2 = 1$.

Ток каждой фазы, как и для обмотки с кольцами, будет

$$I_2 \approx 0,9 \cdot I_1 \cdot \frac{m_1 \cdot f_1 \cdot w_1}{m_2 \cdot f_2 \cdot w_2}, \dots \dots \dots (83)$$

где

$$f_2 = 1 \text{ и } w_2 = 0,5.$$

Так как каждая фаза состоит из p параллельных проводников, то сила тока в каждом проводнике

$$i_2 = \frac{I_2}{p}.$$

Сила тока в кольце, замыкающем проводники накоротко ¹⁾,

$$I_r = \frac{I_2}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{m_2}} \dots \dots \dots (84)$$

Задавшись плотностью тока Δ_2 — в проводниках и Δ_r — в кольце [Δ_2 — для обмотки в виде беличьего колеса берут обычно равным $5 \div 6 \text{ А/мм}^2$, а Δ_r в виду лучших условий охлаждения может быть взято около $(1,15 \div 1,25) \Delta_2$], определяем сечения проводников и кольца, по формулам

$$q_r = \frac{I_r}{\Delta_r} \dots \dots \dots (85)$$

и

$$q_2 = \frac{I_2}{\Delta_2} \dots \dots \dots (86)$$

В остальном поступаем, как и при обмотках других систем.

8. Омическое сопротивление обмоток.

а) Обмотка статора.

Омическое сопротивление одной фазы статорной обмотки, в которой на фазу приходится a_1 параллельных ветвей, определяется из выражения

$$r_{g1} = \frac{2w_1}{a_1} \cdot \frac{l_{a1}}{48 \cdot q_g} \dots \dots \dots (87)$$

где l_{a1} — длина половины статорного витка в метрах, определяемая по чертежу; приблизительно можно считать, что

$$l_{a1} = l + 1,4\tau + (3 \div 8) \text{ см} \dots \dots \dots (88)$$

48 — удельное сопротивление меди при нагревании на 45°C .

q_g — поперечное сечение проводника одной ветви.

Благодаря вихревым токам и неравномерному распределению тока по сечению, джоулевы потери здесь будут больше, чем при прохождении постоянного тока. Это обстоятельство учитывается тем, что полученное по уравнению (87) сопротивление умножают на коэффициент $\gamma > 1$. Сопротивление

$$r_1 = \gamma \cdot r_{g1} = \gamma \cdot \frac{2w_1}{a_1} \cdot \frac{l_{a1}}{48 \cdot q_g} \dots \dots \dots (89)$$

называется действующим или эффективным сопротивлением.

Согласно теоретических изысканий Emde, Pohl'a, Thomson'a, Press'a и др. ²⁾ величина коэффициента γ может быть определена из следующих формул:

1) для медных проводников прямоугольного сечения

$$\gamma = 1 + \frac{\lambda^2 - 0,2}{9(1 + \lambda)} \cdot h^4 \dots \dots \dots (90)$$

2) для медных проводников круглого сечения

$$\gamma = 1 + \frac{\lambda^2 - 0,2}{15,25(1 + \lambda)} \cdot d^4 \dots \dots \dots (91)$$

¹⁾ Вывод формулы (81) см. Arnold—Wechselstromtechnik, т. V, 1, стр. 54, 57.

²⁾ Интересующихся подробностями отсылаем к книге проф. Richter'a—Elektrische Maschinen, т. I, 1924, стр. 241 и сл.

В этих формулах:

x — число лежащих друг над другом по высоте впадины проводников,

λ — отношение $\frac{l}{l_s} = \frac{\text{длина статора}}{\text{длина одного лобового соединения}}$, при чем величина

$$l_s \approx 1,4\tau + (3 \div 8) \text{ см},$$

h — высота сечения одного прямоугольного проводника (голого),

d — диаметр одного круглого проводника (голого).

б) Обмотка ротора.

а) Обмотка с кольцами. Сопротивление обмотки с кольцами определяется по тем же формулам, что и для статорной обмотки, т.е.

омическое сопротивление

$$r_{s2} = \frac{2 \cdot w_2}{a_2} \cdot \frac{l_{s2}}{48 \cdot q_r},$$

эффективное сопротивление

$$r_2 = \gamma \cdot r_{s2} = \gamma \cdot \frac{2w_2}{a_2} \cdot \frac{l_{s2}}{48 \cdot q_r}.$$

Здесь длина половины роторного витка будет:

для малых двигателей

$$l_{s2} = l + 1,2\tau + (1 \div 4) \text{ см},$$

для больших двигателей

$$l_{s2} = l + 1,3\tau + (3 \div 6) \text{ см}.$$

Соответственно этому получится и величина

$$l_{s2} = 1,2\tau + (1 \div 4) \text{ см}$$

или

$$l_{s2} = 1,3\tau + (3 \div 6) \text{ см}.$$

б) Короткозамкнутая обмотка. Для обмотки в виде беличьего колеса сопротивление одного проводника

$$r_s = \frac{l}{48 \cdot q_r} \dots \dots \dots (92)$$

Сопротивление участка кольца между двумя проводниками

$$r_r = \frac{\pi D_r}{z_2 \cdot 48 \cdot q_k} \dots \dots \dots (93)$$

В уравнениях (92) и (93):

l — длина одного стержня в метрах,

D_r — средний диаметр кольца в метрах,

Полное омическое сопротивление ротора

$$r_{s2} = \frac{1}{p} \left[r_s + \frac{2r_r}{\left(2 \sin \frac{\pi}{m_2} \right)^2} \right].$$

Эффективное сопротивление ротора

$$r_2 = \gamma \cdot \frac{1}{p} \left[r_s + \frac{2r_r}{\left(2 \sin \frac{\pi}{m_2} \right)^2} \right] \dots \dots \dots (94)$$

9. Сопротивление короткого замыкания.

Сопротивлением короткого замыкания называется выражение:
для трехфазных двигателей

$$r_k = r_1 + r_2' \quad (95)$$

для однофазных двигателей ¹⁾

$$r_k = r_1 + 2r_2' \quad (95a)$$

где r_2' — приведенное к числу витков статора сопротивление одной фазы ротора
для многофазных двигателей

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{m_1 \cdot \omega_1^2 \cdot f_1^2}{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot f_2^2} \quad (96)$$

для однофазных двигателей

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{\omega_1^2 \cdot f_1^2}{4\omega_2^2 \cdot f_2^2} \quad (96a)$$

Для ротора с обмоткой в виде беличьего колеса $\omega_2 = \frac{1}{2}$, $f_2 = 1$ и $m_2 = \frac{z_2}{p}$, поэтому

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4 \cdot p \cdot m_1 \cdot \omega_1^2 \cdot f_1^2}{z_2} \quad (97)$$

10. Определение размеров роторных контактных колец и щеток.

Размеры контактных колец должны быть выбраны так, чтобы плотность тока в месте перехода со щетки на кольцо и линейная скорость на поверхности кольца не превышали норм, установленных для данного сорта щеток.

Проект общесоюзного стандарта ²⁾ предусматривает следующие сорта щеток:

- а) щетки марки „У“ — угольные (твердые),
- б) „ „ „ПГ“ — полуграфитные (полутвердые),
- в) „ „ „Г“ — графитные (мягкие),
- г) „ „ „МГ“ — меднографитные (мягкие),
- д) „ „ „МУ“ — медноугольные (полутвердые),
- е) „ „ „М“ — металлические твердые.

Для асинхронных двигателей получают применение сорта „Г“, „МГ“, „МУ“, при чем

сорт „Г“ — для стальных контактных колец

„ „ МГ“ — „ бронзовых „ „

„ „ МУ“ — „ „ и железных „ „

Нормальное удельное давление на кольца должно быть для этих сортов:

	М а р к и		
	„Г“	„МГ“	„МУ“
Удельное давление на кольцо в g/cm^2	200	150	200

¹⁾ Здесь взято $2r_2'$ так как обмотка статора состоит из двух фаз нормальной трехфазной обмотки.

²⁾ „Электричество“, 1928, стр. 353.

Номинальное удельное сопротивление щеток должно быть в пределах следующей таблицы.

	М а р к и		
	„Г“	„МГ“	„МУ“
	28—12	0,1—0,2	10—2
Удельное сопротивление $\frac{\Omega \text{ мм}^2}{\text{м}}$			

Номинальными плотностями тока являются следующие значения.

	М а р к и		
	„Г“	„МГ“	„МУ“
	15—20	35	18—25
Плотность тока на кольцо в А/см^2			

Коэффициент трения не должен выходить за пределы значений следующей таблицы.

	М а р к и		
	„Г“	„МГ“	„МУ“
	0,20	0,15	0,18
Коэффициент трения о кольцо			

Падение напряжения в контакте коллектор—щетки не должно превышать следующих значений.

	М а р к и		
	„Г“	„МГ“	„МУ“
	0,9	0,25	0,9
Предельное падение напряжения V			

Что касается размеров щеток, то предположено стандартизовать следующие:
 длину (по оси кольца) — l_b ,
 ширину (по окружности кольца) — b_b ,
 высоту (по радиусу кольца) — h_b .

Щетки марки „Г“.

l_b	b_b	h_b		
13	8	30	—	—
13	10	40	50	—
13	15	35	—	—
18	8	30	—	—
18	15	55	—	—
18	20	55	—	—
18	25	55	—	—
20	6	40	—	—
20	8	45	—	—
20	10	30	40	50
20	15	45	—	—
22	30	25	—	—
25	10	30	35	—
25	15	35	—	—
30	7	45	—	—
30	10	45	—	—
30	13	30	50	—
30	15	40	—	—
30	16	50	—	—
30	20	50	—	—
30	23	45	—	—
30	30	25	—	—
32	9	50	60	—
32	12	55	—	—
32	13	50	60	—
32	16	50	60	—
32	19	50	60	—
32	22	60	—	—
32	25	50	60	—
32	28	60	—	—
40	14	60	—	—

Щетки марки „МГ“.

l_b	b_b	h_b		
8	13	35	—	—
8	20	25	—	—
8	22	25	30	—
8	25	40	—	—
10	10	15	—	—
10	20	30	—	—
10	28	25	—	—
13	25	40	—	—
15	25	40	—	—
15	30	50	—	—
16	12	20	—	—
20	15	25	—	—
20	25	30	40	—
22	8	20	—	—
22	19	30	—	—
25	25	55	—	—
25	30	30	—	—
28	10	35	—	—
30	23	35	—	—
30	25	35	—	—
32	9	50	—	—
36	12	30	—	—
40	16	50	—	—
44	16	35	—	—

Щетки марки „МУ“.

l_b	b_b	h_b
16	22	20
20	15	45
22	18	25
30	10	30
30	24	35
30	35	45
45	12	35

В приводимой ниже таблице (Richter) даны свойства наиболее употребительных для контактных колец сортов щеток германского сортамента.

Сорт щетки	Удельное сопротивление ρ mm^2/m при 15°С	При работе без сотрясений				Коэффициент трения	Примечание
		Плотн тока A/cm^2	Потери на прижатия щетки V	Нажатие kg/cm^2	Окружная скорость $\text{m}/\text{сек.}$		
Бронзографитные МК ₁	0,8	25—30	0,2	0,15	25	0,15	Кольца из твердой бронзы
Меднографитные КК ₄	2	20	0,33	0,15	20	0,16	Кольца из бронзы и железа
Мягкие высокографитированные ЛФС ₁	18	12—15	0,75	0,1	45	0,17	Кольца
Мягкие электрографитированные X	20	10—12	0,8	0,125	10—15	0,27	Кольца

Если I_b — сила тока ротора и Δ_b — допускаемая плотность тока для данного сорта щеток (берется из таблиц), то площадь прилегания щетки к кольцу должна быть равна

$$F_b = \frac{I_b}{\Delta_b}.$$

В больших машинах на каждом кольце следует устанавливать по меньшей мере две щетки для того, чтобы при порче щеткодержателя не оборвалась цепь ротора, а также для того, чтобы ремонт мог производиться, не останавливая машину.

Таким образом, площадь каждой щетки определится из выражения

$$F_b' = \frac{F_b}{n_b},$$

где n_b — число щеток одного кольца.

По проекту Союза германских электротехников нормальными размерами щеток являются следующие:

Поверхность прилегания		Высота <i>мм</i>	Поверхность прилегания		Высота <i>мм</i>
размеры <i>мм</i>	площадь <i>см²</i>		размеры <i>мм</i>	площадь <i>см²</i>	
5 × 5	0,25	—	20 × 20	4	32 и 50
6,4 × 5	0,32	16	20 × 25	5	50
6,4 × 6,4	0,4	16	20 × 32	6,4	32
6,4 × 8	0,51	—	20 × 40	8	40 и 50
6,4 × 10	0,64	—			
6,4 × 12,5	0,8	—	25 × 5	1,25	—
6,4 × 16	1,02	16	25 × 6,4	1,6	—
			25 × 8	2	25, 32, 40 и 64
8 × 5	0,4	—	25 × 10	2,5	25, 32, 40 и 64
8 × 6,4	0,51	—	25 × 12,5	3,12	25, 40 и 64
8 × 8	0,64	—	25 × 16	4	40 и 64
8 × 10	0,8	—	25 × 20	5	40, 50 и 64
8 × 12,5	1	—	25 × 25	6,25	40 и 64
8 × 16	1,28	32	25 × 32	8	—
8 × 20	1,6	20 и 25	25 × 40	10	—
8 × 25	2	20	25 × 50	12,5	40 и 50
10 × 5	0,5	20 и 25	32 × 5	1,6	32
10 × 6,4	0,64	20	32 × 6,4	2	40
10 × 8	0,8	20 и 25	32 × 8	2,56	32, 40 и 64
10 × 10	1	20 и 25	32 × 10	3,2	32, 40, 50 и 64
10 × 12,5	1,25	25	32 × 12,5	4	25, 32, 40, 50 и 64
10 × 16	1,6	25	32 × 16	5,12	32, 40, 50 и 64
10 × 20	2	—	32 × 20	6,4	25, 50 и 64
10 × 25	2,5	25, 32 и 40	32 × 25	8	25 и 50
			32 × 32	10,24	—
12,5 × 5	0,62	—	32 × 40	12,8	50
12,5 × 6,4	0,8	32	32 × 50	16	50
12,5 × 8	1	32 и 40			
12,5 × 10	1,25	32 и 40	40 × 5	2	32
12,5 × 12,5	1,56	—	40 × 6,4	2,56	—
12,5 × 16	2	25, 32 и 40	40 × 8	3,2	40
12,5 × 20	2,5	40	40 × 10	4	40, 50 и 64
12,5 × 25	3,12	40	40 × 12,5	5	40 и 64
12,5 × 32	4	32	40 × 16	6,4	40, 50 и 64
12,5 × 40	5	40	40 × 20	8	40, 50 и 64
			40 × 25	10	50 и 64
16 × 5	0,8	—	40 × 32	12,8	64
16 × 6,4	1,02	16, 25 и 32	40 × 40	16	—
16 × 8	1,28	16 и 25	40 × 50	20	—
16 × 10	1,6	25 и 32			
16 × 12,5	2	25 и 40	50 × 5	2,5	—
16 × 16	2,56	25 и 32	50 × 6,4	3,2	—
16 × 20	3,2	—	50 × 8	4	—
16 × 25	4	—	50 × 10	5	—
16 × 32	5,12	32	50 × 12,5	6,25	64 и 80
16 × 40	6,4	40 и 50	50 × 16	8	—
			50 × 20	10	—
20 × 5	1	32	50 × 25	12,5	—
20 × 6,4	1,28	—	50 × 32	16	—
20 × 8	1,6	20 и 32	50 × 40	20	—
20 × 10	2	20, 32 и 50	50 × 50	25	—
20 × 12,5	2,5	32 и 40			
20 × 16	3,2	16, 32 и 50			

Нормальные размеры контактных колец, по нормам Союза германских электротехников, даны в следующей таблице:

Диаметры в <i>мм</i> . .	40, 45, 50, 56, 64, 72, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160,
	180, 200, 225, 280, 320, 360, 400, 500, 560, 640, 720, 800.
Ширина в <i>мм</i> . .	10, 11, 12 ¹ / ₂ , 14, 16, 18, 20, 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50.

При выборе диаметра колец руководствуются конструктивными соображениями, а также тем требованием, чтобы окружная скорость на поверхности кольца для данного сорта щеток не превышала величин, указанных в таблицах для щеток.

Ширину контактных колец берут равной ширине щетки или несколько больше.

Для машин с подъемом щеток и для машин мощностью до 7,5 kW на каждое кольцо достаточно одной щетки.

По нормам Союза германских электротехников, а также по проекту Стандарта ВЭО, диаметры пальцев щеткодержателей должны иметь следующие размеры в *мм*: 8, 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40.

Материал пальцев:

- 1) прутки медные, круглые, чистотянутые,
- 2) трубы медные, тянутые,
- 3) прутки латунные, круглые, чистотянутые,
- 4) трубы латунные, тянутые,
- 5) прутки стальные, круглые, чистотянутые,
- 6) трубы стальные, тянутые.

Г Л А В А III.

Расчет магнитной цепи.

1. Определение величины магнитного потока.

Величина магнитного потока одного полюса

$$\Phi = \frac{E_1' \cdot 10^8}{\pi \sqrt{2} \cdot f \cdot w_1 \cdot f_1} \dots \dots \dots (98)$$

где E_1' — ЭДС одной фазы статора, равная

$$E_1 - \varepsilon E_1 = E_1 (1 - \varepsilon).$$

Здесь εE_1 — величина падения напряжения вследствие прохождения тока через обмотку статора. В среднем для трехфазных двигателей можно принимать данные следующей таблицы

Мощность kW	ε
0,1 — 1,1	0,11 — 0,06
1,1 — 7,5	0,06 — 0,04
7,6 — 25	0,04 — 0,03
26 — 100	0,03 — 0,02
101 — 1 000	~ 0,02
свыше 1 000	~ 0,015

Эта же таблица может применяться и для однофазных двигателей, если оперировать с приведенной мощностью (см. гл. II, 1).

Индукция в междужелезном пространстве

$$B_l = \frac{\Phi}{a_l \cdot \tau \cdot l_l} \dots \dots \dots (99)$$

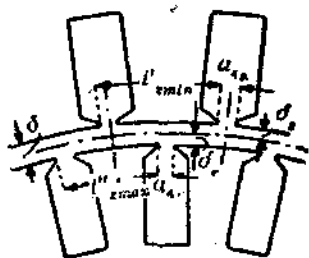
2. Определение теоретической величины воздушного промежутка.

В гл. II, 4, мы уже определили величину действительного воздушного промежутка δ . Благодаря наличию в статоре и роторе зубцов и впадин, величина воздушного промежутка не остается постоянной, а колеблется в пределах от δ до $\delta + h_{n1} + h_{n2}$. Поэтому при расчете магнитной цепи вводится так называемый теоретический (или расчетный) воздушный промежуток

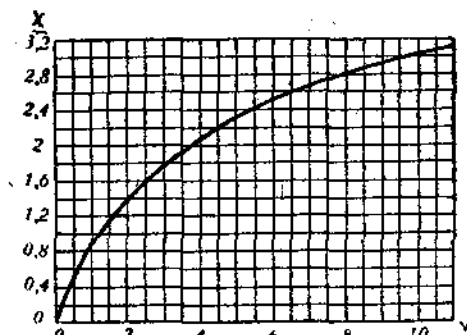
$$\delta' = k_1 \cdot \delta, \dots \dots \dots (100)$$

где коэффициент $k_1 > 1$.

Определение величины k_1 может быть произведено по методу Kutt'a на основании следующих рассуждений.



Фиг. 61.



Фиг. 62.

Вообразим, что в воздушном промежутке расположена цилиндрическая поверхность, концентрическая с поверхностями статора и ротора (фиг. 61), и найдем магнитные проводимости между этой поверхностью и поверхностями статора и ротора. Величины δ_s и δ_r мы найдем из выражения

$$\frac{a_{st}}{\delta_s} = \frac{a_{rt}}{\delta_r} = \frac{a_{st} + a_{rt}}{\delta} = v,$$

откуда

$$\delta_s = \frac{a_{st} \cdot \delta}{a_{st} + a_{rt}},$$

$$\delta_r = \frac{a_{rt} \cdot \delta}{a_{st} + a_{rt}}.$$

Далее определяем величины

$$k_s = \frac{l'_{s \min}}{l'_{s \min} - a_{st} + X \delta_s},$$

$$k_r = \frac{l'_{s \max}}{l'_{s \max} - a_{rt} + X \delta_r},$$

где X берется из кривой фиг. 62 в зависимости от отношения

$$v = \frac{a_{st} + a_{rt}}{\delta}.$$

Так как воздушные промежутки δ_s и δ_r включены последовательно, то магнитное сопротивление всего воздушного промежутка будет равно

$$\frac{0,8 \cdot \delta \cdot k_1}{\tau \cdot l} = \frac{0,8 \cdot \delta_s \cdot k_s}{\tau \cdot l} + \frac{0,8 \cdot \delta_r \cdot k_r}{\tau \cdot l},$$

откуда

$$k_1 = \frac{\delta_s \cdot k_s + \delta_r \cdot k_r}{\delta} \dots \dots \dots (101)$$

3. Определение высоты тела статора и ротора.

Длина чистого железа статора и ротора определяется по формуле

$$l_0 = 0,9 (l - bL), \dots \dots \dots (102)$$

где l — полная длина статора или ротора,

b — число воздушных (вентиляционных) щелей,

L — ширина одной щели,

0,9 — коэффициент, учитывающий толщину изоляции между железными листами.

Так как магнитный поток в теле статора и ротора разветвляется на две половины, то, задавшись магнитной индукцией B_{a1} (для статора) и B_{a2} (для ротора), найдем (фиг. 63), что:

высота тела статора

$$h_s = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{a1} \cdot l_0}, \dots \dots \dots (103)$$

высота тела ротора

$$h_r = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{a2} \cdot l_0} \dots \dots \dots (104)$$

При выборе величин B_{a1} и B_{a2} нужно руководствоваться сказанным в гл. I, 8.

4. Общий метод расчета магнитной цепи.

После того как все размеры магнитной системы двигателя нами найдены, для удобства последующих расчетов следует вычертить ее эскиз. При этом у многополюсных машин нет надобности вычерчивать всю магнитную цепь; достаточно ограничиться той ее частью, которая соответствует двойному полюсному делению, подобно тому, как это сделано на фиг. 63. На этом же эскизе нужно нанести путь средней силовой линии, проходящей через остов статора, остов ротора и по два раза через воздушный промежуток, зубцы статора и зубцы ротора. Соответствующие отрезки этой линии, мы обозначим:

для тела статора — l_s ,

для тела ротора — l_r ,

для зубцов статора — $l_{zs} = h_{zs}$,

для зубцов ротора — $l_{zr} = h_{zr}$,

для воздушного промежутка — $l_1 = \delta$.

Линейный интеграл напряженности магнитного поля вдоль этой замкнутой линии будет, как известно равен

$$\int H \cdot dl = 0,4\pi \cdot i \cdot w \quad \text{или} \quad 0,8 \int H \cdot dl = iw,$$

где iw равно удвоенной амплитуде основной волны кривой магнитодвижущей силы. Так как средняя силовая линия состоит из двух симметричных половин, то доста-

точно распространить интегрирование лишь на одну половину, и тогда полученная величина будет равна амплитуде F основной волны кривой МДС.

Так как на отдельных участках магнитной цепи напряженность магнитного поля одинакова вдоль всего участка, то интеграл можно заменить суммой ¹⁾

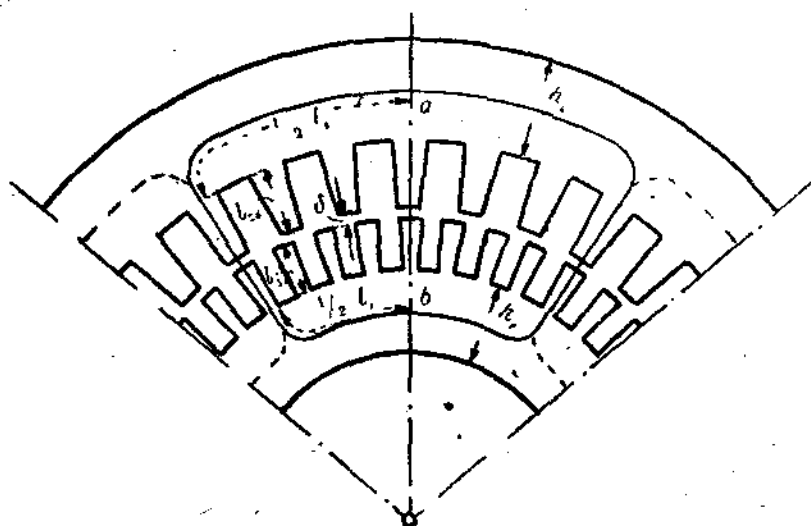
$$F = 0,8 \int_a^b H \cdot dl = \sum (0,8 \cdot H_x \cdot l_x),$$

или, так как

$$0,8 \cdot H_x = a\omega_x,$$

где $a\omega_x$ — число ампервитков на 1 см пути l_x , то

$$F = \sum (a\omega_x \cdot l_x).$$



Фиг. 63.

Для нашего случая

$$F = a\omega_1 \cdot l_1 + a\omega_{12} \cdot l_{12} + a\omega_{21} \cdot l_{21} + a\omega_2 \cdot \frac{1}{2} l_2 + a\omega_r \cdot \frac{1}{2} l_r.$$

Так как для воздушного промежутка число ампервитков удобнее определять по формуле

$$AW_l = 0,8 \cdot H_l \cdot l_l = 0,8 \cdot B_l \cdot l_l,$$

то, принимая также во внимание (97), можно написать

$$F = 0,8 \cdot B_l \cdot \delta' + a\omega_{12} \cdot h_{12} + a\omega_{21} \cdot h_{21} + a\omega_2 \cdot \frac{1}{2} l_2 + a\omega_r \cdot \frac{1}{2} l_r,$$

где длины $\frac{1}{2} l_2$ и $\frac{1}{2} l_r$ удобнее всего определять непосредственно из эскиза магнитной цепи.

¹⁾ Пределы интегрирования соответствуют точкам a и b на фиг. 63.

При однофазном токе и при наличии одной впадины на полюс (и фазу), кривая МДС будет иметь форму прямоугольника, при чем амплитуда (высота прямоугольника)

$$F_1 = \left(\sqrt{2} \cdot I_\mu \right) \left(\frac{n_{w1}}{2} \right),$$

где I_μ — эффективное значение силы намагничивающего тока,

$\frac{n_{w1}}{2}$ — число витков, приходящееся на одну впадину.

Для кривой прямоугольной формы амплитуда основной синусоиды (первой гармонической) будет, как известно ¹⁾

$$F_1' = \frac{4}{\pi} F_1,$$

т.е. в нашем случае

$$F_1' = \frac{4}{\pi} \sqrt{2} \cdot I_\mu \cdot \frac{n_{w1}}{2} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot I_\mu \cdot n_{w1}.$$

Если однофазная обмотка имеет q_1 впадин на полюс (и фазу), то в таком случае амплитуда МДС будет

$$F = f_1 \cdot q_1 \cdot F_1' = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot f_1 \cdot q_1 \cdot I_\mu \cdot n_{w1}.$$

Так как, кроме того

$$n_{w1} = \frac{w_1}{p \cdot q_1},$$

то для однофазной обмотки

$$F = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w_1 \cdot f_1}{p} \cdot I_\mu = 0,9 \frac{w_1 \cdot f_1}{p} \cdot I_\mu.$$

Так как

$$F = \sum (a w_x \cdot l_x),$$

то

$$\begin{aligned} I_\mu &= \frac{1,11 \cdot p}{w_1 \cdot f_1} \left(0,8 \cdot B_l \cdot \delta' + a w_{zs} \cdot h_{n1} + a w_{zr} \cdot h_{n2} + a w_s \cdot \frac{1}{2} l_s + a w_r \cdot \frac{1}{2} l_r \right) = \\ &= \frac{1,11 \cdot p}{w_1 \cdot f_1} (A W_l + A W_{zs} + A W_{zr} + A W_s + A W_r); \end{aligned}$$

Для симметричной m_1 -фазной обмотки амплитуда МДС будет в $\frac{m_1}{2}$ раз больше, чем для соответствующей однофазной ²⁾.

Поэтому для трехфазного двигателя

$$F = \frac{m_1}{2} \cdot 0,9 \cdot \frac{w_1 \cdot f_1}{p} \cdot I_\mu = \frac{3 \cdot 0,9}{2} \cdot \frac{w_1 \cdot f_1}{p} \cdot I_\mu = 1,35 \frac{w_1 \cdot f_1}{p} \cdot I_\mu$$

и намагничивающий ток одной фазы

$$\begin{aligned} I_\mu &= \frac{0,74 \cdot p}{w_1 \cdot f_1} \left(0,8 \cdot B_l \cdot \delta' + a w_{zs} \cdot h_{n1} + a w_{zr} \cdot h_{n2} + a w_s \cdot \frac{1}{2} l_s + a w_r \cdot \frac{1}{2} l_r \right) = \\ &= \frac{0,74 \cdot p}{w_1 \cdot f_1} (A W_l + A W_{zs} + A W_{zr} + A W_s + A W_r) \dots (105) \end{aligned}$$

¹⁾ См., напр., А. Fraenkel—Theorie der Wechselströme, 2-е изд. 1921 г., стр. 77.

²⁾ См. Arnold—Wechselstromtechnik. т. III, стр. 241.

5. Нахождение ампервитков для воздушного промежутка (AW).

Максимальная индукция в воздушном промежутке зависит от кривой распределения индукции вдоль полюсного деления и имеет величину

$$B_i = \frac{\Phi}{\alpha_i \cdot \tau \cdot l_i}, \dots \dots \dots (106)$$

где для синусоидального распределения индукции, коэффициент

$$\alpha_i = \frac{2}{\pi} \approx 0,637 \dots \dots \dots (107)$$

Однако, вследствие насыщения зубцов основная синусоида МДС дает не синусоидальную форму кривой магнитной индукции, а более плоскую, благодаря чему величина максимальной индукции B_i уменьшается. Чтобы учесть это обстоятельство, коэффициент α_i в уравнении (106) должен быть увеличен. Если амплитуда синусоидальной МДС известна, то, зная число ампервитков для воздушного промежутка и зубцов статора и ротора, легко найти истинную форму кривой B_i и величину коэффициента α_i ¹⁾.

Однако, при расчете машины приходится определять как-раз наоборот—амплитуду МДС по заданному магнитному потоку. В этом случае величину α_i , а следовательно и истинные величины B_i и $\sum (AW)$ можно определить только путем последовательного приближения. Для этого предполагают сперва, что кривая изменения индукции будет синусоидальной и, следовательно,

$$B_i = \frac{\Phi}{0,637 \cdot \tau \cdot l_i} \dots \dots \dots (108)$$

Пользуясь этой величиной, находим AW_r , AW_{σ} и AW_{st} . После этого определяем, как будет указано ниже, истинную величину α_i и снова пересчитываем B_i , AW_r , AW_{σ} и AW_{st} , после чего снова проверяем величину α_i .

Число ампервитков для воздушного промежутка, как уже было указано выше, определяется по формуле

$$AW_i = 0,8 \cdot B_i \cdot \tau' \dots \dots \dots (109)$$

6. Нахождение ампервитков для зубцов статора и ротора (AW_{σ} и AW_r).

Нахождение ампервитков для зубцового слоя осложняется тем обстоятельством, что здесь мы имеем два параллельных магнитных сопротивления: железный зубец и заполненная немагнитным материалом впадина. При малых индукциях магнитным сопротивлением железа по сравнению с сопротивлением впадины можно пренебречь и считать, что весь поток проходит исключительно через зубцы. Однако, при тех больших насыщениях, которые встречаются в зубцах современных машин, сопротивление железа настолько возрастает, что заметная часть силовых линий проходит через впадину. Если при этом индукцию в зубцах определять по формуле

$$B_{\sigma} = \frac{\Phi}{Q_{\sigma}},$$

где Q_{σ} —площадь поперечного сечения всех зубцов, приходящихся на одно полюсное деление, то полученный результат не будет соответствовать действительности, а именно, полученная индукция B_{σ} будет больше действительной индукции B_{σ} , причем расхождение будет тем больше, чем сильнее насыщены зубцы. Величину B_{σ} часто называют теоретической или кажущейся индукцией.

¹⁾ См. Arnold—Wechselstromtechnik, т. III, стр. 276 и сл.

Теоретическую индукцию можно еще определить следующим образом (фиг. 64)¹⁾.

Если t_z — зубцовое деление на поверхности статора или ротора, то магнитный поток, проходящий на это деление

$$\Phi_z = B_z \cdot l_z \cdot t_z$$

Так как площадь чистого железа в каком-либо сечении зубца, имеющем ширину Z_z , выражается формулой

$$Q_z' = l_z \cdot Z_z$$

то

$$B_z = \frac{B_z \cdot l_z \cdot t_z}{l_z \cdot Z_z} \dots \dots \dots (110)$$

В действительности, поток Φ_z не проходит целиком через зубец, а частично ответвляется во впадину, так что можно написать

$$\Phi_z = \Phi_1 + \Phi_2, \dots \dots \dots (111)$$

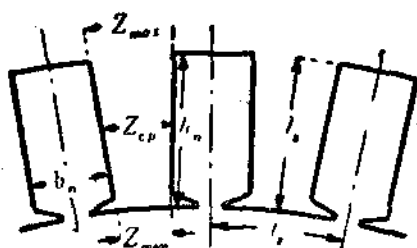
где Φ_1 — поток, проходящий через зубец, и Φ_2 — поток, проходящий через впадину.

Разделим уравнение (110) на Q_z' ; тогда

$$\frac{\Phi_z}{Q_z'} = \frac{\Phi_1}{Q_z'} + \frac{\Phi_2}{Q_z'} \dots \dots \dots (112)$$

Второй член правой части умножим и разделим на Q'' , где

$$Q'' = b_n \cdot l_z, \dots \dots \dots (113)$$



Фиг. 64.

т.е. равно площади поперечного сечения впадины; тогда

$$\frac{\Phi_z}{Q_z'} = \frac{\Phi_1}{Q_z'} + \frac{\Phi_2}{Q''} \cdot \frac{Q''}{Q_z'} \dots \dots \dots (114)$$

Принимая во внимание, что

$$\frac{\Phi_1}{Q_z'} = B_z \text{ и } \frac{\Phi_2}{Q''} = H,$$

где H — напряженность магнитного поля, получим, что

$$B_z = B_{zv} + H \frac{Q''}{Q_z'}, \dots \dots \dots (115)$$

где $B_{zv} = \frac{\Phi_1}{Q_z'}$ будет действительная индукция в зубце.

Обозначая отношение поперечного сечения впадины к поперечному сечению зубца через k_3 , получим

$$B_z = B_{zv} + k_3 H, \dots \dots \dots (116)$$

где

$$k_3 = \frac{Q''}{Q_z'} = \frac{b_n \cdot l_z}{Z_z \cdot l_z}$$

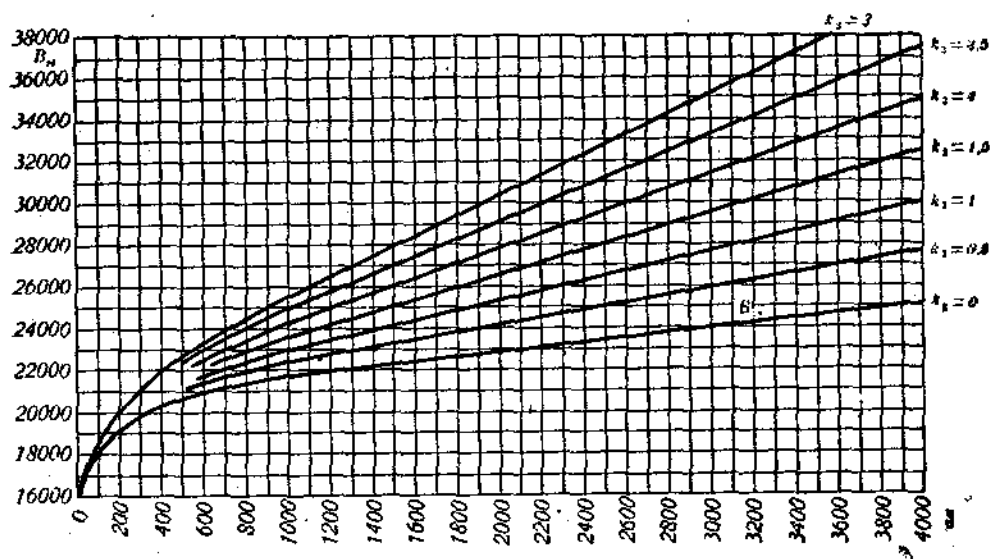
Так как

$$H = \frac{aw_z}{0,8} = 1,25 \cdot aw_z$$

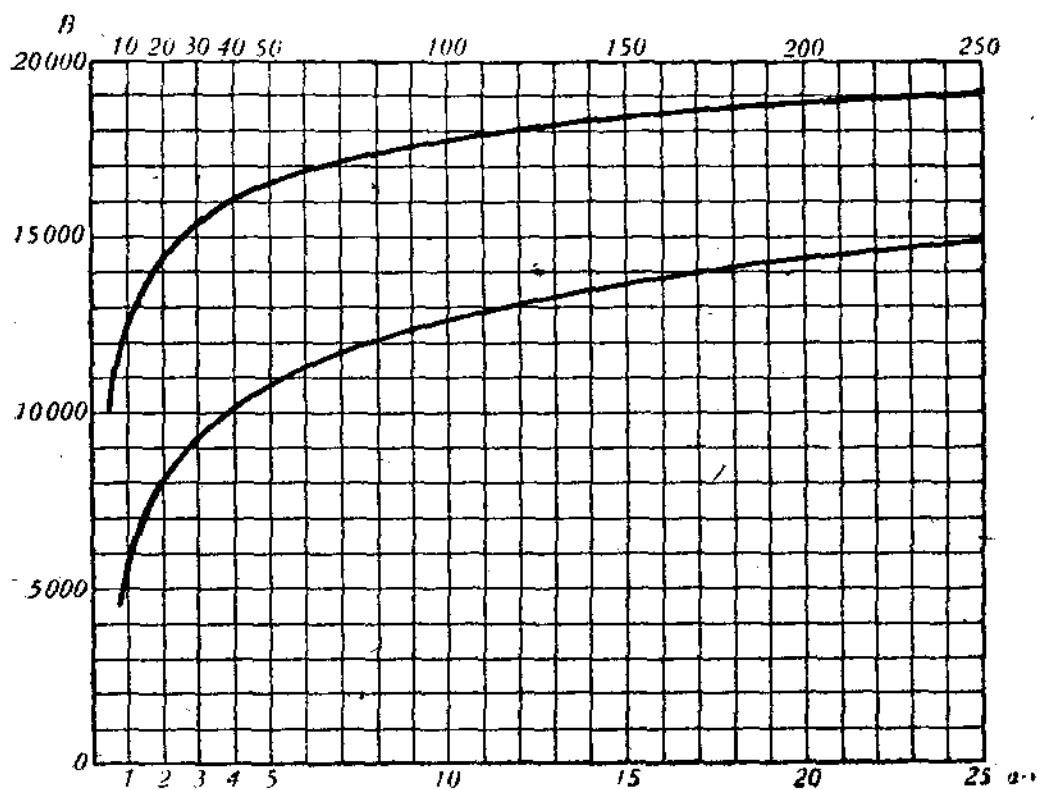
то уравнение (116) можно переписать в виде

$$B_z = B_{zv} + 1,25 \cdot k_3 \cdot aw_z \dots \dots \dots (117)$$

¹⁾ Так как расчет ведется совершенно аналогично как для статора, так и для ротора, то индексы, указывающие на принадлежность обозначения к статору или ротору, опущены.



Фиг. 65.



Фиг. 66.

На фиг. 65 нанесен ряд кривых, построенных по уравнению (117) для различных k_3 . Чтобы найти необходимое число ампервитков, соответствующее действительной индукции B_{st} , определяем теоретическую индукцию B_{st} [по уравнению (110)] и отношение k_3 . Далее откладываем на оси ординат найденную величину B_{st} , проводим горизонтальную линию до пересечения с кривой, соответствующей найденному k_3 , и из этой точки опускаем перпендикуляр на ось абсцисс, который и укажет нам необходимое число aw_z (на *см*). Если для найденного значения k_3 соответствующей кривой на фиг. 65 не имеется (напр., если $k_3 = 1,8$), то приходится прибегать к интерполированию.

Из фиг. 65 видно, что при индукциях, меньших 18 000, различия между B_{st} и $B_{st'}$ практически не наблюдается, и в этом случае определение индукции можно вести просто по уравнению (110), а число aw_z определять по кривым фиг. 66. Значения числа ампервитков для верхней кривой даны наверху, а для нижней—внизу.

Так как площадь зубца в различных его сечениях неодинакова, то определяем B_{st} и k_3 (если $B_{st} > 18\,000$) для трех сечений: вершины, основания и середины высоты ¹⁾.

$$\left. \begin{aligned} B_{st \max} &= \frac{B_l \cdot t_z \cdot l_l}{l_o \cdot Z_{\min}} \\ B_{st \text{ ср}} &= \frac{B_l \cdot t_z \cdot l_l}{l_o \cdot Z_{\text{ср}}} \\ B_{st \min} &= \frac{B_l \cdot t_z \cdot l_l}{l_o \cdot Z_{\max}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (118)$$

Соответствующие значения k_3 будут

$$\left. \begin{aligned} k_3' &= \frac{b_n \cdot l_l}{l_o \cdot Z_{\min}} \\ k_3'' &= \frac{b_n \cdot l_l}{l_o \cdot Z_{\text{ср}}} \\ k_3''' &= \frac{b_n \cdot l_l}{l_o \cdot Z_{\max}} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (119)$$

Для каждого из этих сечений определяем по фиг. 65 (или по фиг. 66, если $B_{st} < 18\,000$) число ампервитков на *см*— $aw_{z \max}$, $aw_{z \text{ ср}}$ и $aw_{z \min}$.

Полное число ампервитков определяется по формуле Simpson'a-Arnold'a

$$AW_z = l_s \cdot \frac{aw_{z \max} + 4aw_{z \text{ ср}} + aw_{z \min}}{6} \dots \dots \dots (120)$$

При определении индукции, закругления при овальных и полузакрытых впадинах можно не принимать во внимание и считать, что зубцы ограничены прямыми линиями.

7. Определение истинной величины α_i и истинных значений

$$AW_l, AW_{zs}, AW_{sr}$$

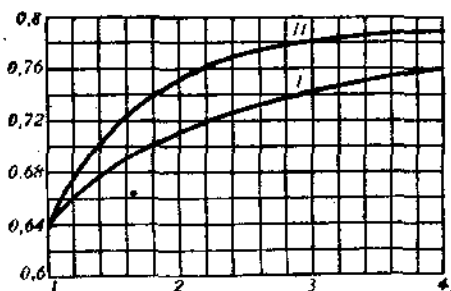
Общая МДС состоит из двух частей, из которых одна (AW_l) пропорциональна напряженности магнитного поля, а другая ($AW_{zs} + AW_{sr}$) ей не пропорциональна. Поэтому искажение кривой магнитной индукции, а вместе с тем увеличение α_i зависит от отношения

$$k_2 = \frac{AW_l + (AW_{zs} + AW_{sr})}{AW_l} = 1 + \frac{AW_{zs} + AW_{sr}}{AW_l} \dots \dots \dots (121)$$

¹⁾ Входящая в ур-ния (118) величина t_z при расчете AW_{zs} принимается равной $t_z'_{\min} = \frac{\pi D}{u_1}$, а при расчете AW_{sr} — равной $t_z''_{\max} = \frac{\pi(D-2\delta)}{u_2}$

Если $k_s = 1$, т.е. если $AW_{zs} + AW_{sr} = 0$, то МДС пропорциональна напряженности поля, т.е. кривая B_i будет синусоидальной и $\alpha_i = \frac{2}{\pi}$. Чем больше $(AW_{zs} + AW_{sr})$ и k_s , тем больше будет искажение кривой и тем больше будет α_i .

На фиг. 67 кривая II представляет собой действительную величину коэффициента α_i , а кривая I является вспомогательной кривой зависимости α_i от коэффициента k_s , соответствующего синусоидальному распределению поля при одинаковой общей величине магнитного потока.



Фиг. 67.

При расчете поступаем следующим образом. Определяем при значении $\alpha_i = \frac{2}{\pi}$ максимальную индукцию в воздушном промежутке (108), подсчитываем AW_z , AW_{zs} и AW_{sr} . Далее определяем коэффициент k_s [уравнение (121)] и по кривой I фиг. 67 находим истинное значение α_i , после чего снова повторяем (уже с новым значением α_i) расчет B_i , AW_z , AW_{zs} и AW_{sr} . Затем снова определяем k_s и по кривой II фиг. 67 находим соответствующее значение α_i , которое должно совпадать с α_i , найденным ранее по кривой I.

Обычно совпадение бывает настолько близким, что дальнейших пересчетов не требуется.

8. Нахождение ампервитков для тела статора и ротора (AW_s и AW_r).

Через тело статора и ротор проходит половина силового потока Φ . Так как поток входит в остов не в одном месте, то индукция не будет иметь постоянной величины вдоль всего пути средней силовой линии. Эту индукцию можно разложить на радиальную и тангенциальную составляющие, при чем первая настолько мала, что ею можно пренебречь. Если кривая поля синусоидальна, то величина тангенциальной составляющей индукции будет изменяться синусоидально, и ее максимум будет лежать в том месте, где сила поля равна нулю. Максимальная индукция будет равна ¹⁾

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot l_a \cdot h} \dots \dots \dots (122)$$

Так как распределение тангенциальной составляющей индукции вдоль средней силовой линии синусоидально, то среднее число ампервитков для тела статора

$$AW_s = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{2} l_s \cdot a w_s = 0,637 \cdot \frac{1}{2} \cdot l_s \cdot a w_s, \dots \dots \dots (123)$$

аналогично для ротора

$$AW_r = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{2} l_r \cdot a w_r = 0,637 \cdot \frac{1}{2} \cdot l_r \cdot a w_r, \dots \dots \dots (124)$$

где значения $a w_s$ и $a w_r$ определяются в зависимости от величины максимальных индукций B_{a1} и B_{a2} по кривым фиг. 66.

¹⁾ В этой формуле индекс для статора и ротора отброшен, так как определение AW_s и AW_r совершенно одинаково.

9. Определение полного числа ампервитков (AW_k) и безваттной составляющей тока холостого хода.

Складывая найденные ампервитки, получаем полное число ампервитков

$$AW_k = AW_l + AW_{zs} + AW_{sr} + AW_s + AW_r \dots (125)$$

и определяем намагничивающий ток

для однофазных двигателей

$$I_{\mu}^I = \frac{1,11 \cdot p \cdot AW_k}{w_1 \cdot f_1} \dots (126)$$

и

для трехфазных двигателей

$$I_{\mu}^{III} = \frac{0,74 \cdot p \cdot AW_k}{w_1 \cdot f_1} \dots (127)$$

Безваттная составляющая тока холостого хода будет равна для трехфазных двигателей

$$I_{01}^{III} \approx I_{\mu}^{III}, \dots (128)$$

а для однофазных двигателей ¹⁾

$$I_{01}^I = I_{\mu}^I \left(1 + \frac{1}{2C_2 - 1} \right) \dots (129)$$

В среднем

$$C_2 \approx 1,025$$

и

$$I_{01}^I \approx 1,95 \cdot I_{\mu}^I \dots (130)$$

Г Л А В А IV.

Ток короткого замыкания.

1. Индуктивное сопротивление обмоток.

а) Обмотка статора.

Благодаря явлению магнитного рассеяния, в проводниках обмотки индуцируется ЭДС рассеяния (вызванная индуктивностью рассеяния), которая будет по фазе опережать проходящий по обмотке ток. Формально этот вопрос можно поставить так, что обмотка обладает, помимо омического, еще индуктивным сопротивлением, которое и создает индуктивное падение напряжения, равное ЭДС рассеяния.

Для удобства практических расчетов весь поток рассеяния разбивается на три части:

1) Поток рассеяния, замыкающийся вокруг проводников, лежащих в одной впадине. Соответствующее ему индуктивное сопротивление обозначим через x_a (для одной фазы).

2) Поток рассеяния, проходящий от головки одного зубца к головке другого и замыкающийся вокруг одной или нескольких впадин. Соответствующее индуктивное сопротивление будет x_p (для одной фазы).

3) Поток рассеяния, замыкающийся вокруг лобовых соединений обмотки. Соответствующее индуктивное сопротивление будет x_s (для одной фазы).

¹⁾ См. Arnold—Wechselstromtechnik, т. V, I, стр. 160, 161.

Кроме того, так же как и рассеяние, влияет неодинаковое сцепление магнитных линий с витками статора и ротора¹⁾. Вызванное этим явлением индуктивное сопротивление обозначим буквой x_d .

Полное индуктивное сопротивление одной фазы обмотки статора равно сумме отдельных сопротивлений, т.е.

$$x_1 = x_n + x_p + x_s + x_d \dots \dots \dots (131)$$

а) Определение индуктивного сопротивления x_n . Если обозначить идеальную магнитную проводимость впадины через Λ_n , то самоиндукция катушки, состоящей из n_{u1} витков (где n_{u1} — число последовательно соединенных проводников одной впадины), будет

$$L_{u1} = n_{u1}^2 \cdot 2 \cdot \Lambda_n.$$

В одной фазе однослойной обмотки имеется $p \cdot q_1$ катушек, поэтому самоиндукция одной фазы

$$L_n = p \cdot q_1 \cdot n_{u1}^2 \cdot 2 \cdot \Lambda_n,$$

а соответствующее индуктивное сопротивление

$$x_n = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_n = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot p \cdot q_1 \cdot n_{u1}^2 \cdot 2 \cdot \Lambda_n.$$

Так как число последовательно соединенных витков одной фазы

$$w_1 = p \cdot q_1 \cdot n_{u1},$$

то

$$x_n = \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot w_1^2}{p} \cdot \frac{\Lambda_n}{q_1} \dots \dots \dots (132)$$

Для обмотки из немагнитного материала

$$\Lambda_n = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot l_t \cdot \lambda_n \text{ генри/см},$$

где λ_n — так называемый коэффициент проводимости.

Подставляя это выражение в уравнение (132), получим

$$x_n = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_t}{p} \cdot \frac{\lambda_n}{q_1} \text{ ом} \dots \dots \dots (133)$$

Коэффициент проводимости зависит от формы впадины, и для наиболее употребительных профилей впадин однослойных обмоток имеет следующие значения²⁾.

Для впадины, имеющей профиль, как на фиг. 68 (слева дана истинная форма впадины, а справа — преобразованная, для удобства вычислений),

$$\lambda_n = k_1 \cdot \frac{h_1}{3a} + \frac{h_2}{a} + \frac{h_3}{a_2} + \frac{h_4}{a_4} \dots \dots \dots (134)$$

Коэффициент k_1 учитывает уменьшение самоиндукции вследствие „skin-effect'a“ и в среднем может быть принят $\approx 0,9$ (для $f = 50$)³⁾.

Для полукруглых впадин, с закруглением сверху (фиг. 69) .

$$\lambda_n = k_1 \cdot \frac{h_1}{3a} + \frac{h_2}{a} + 0,66 + \frac{h_4}{a_4} \dots \dots \dots (135)$$

¹⁾ Так называемое двойное рассеяние (см. § 2 этой главы).

²⁾ Вывод формул для λ см. R. Richter—Elektrische Maschinen, т. I, 1924 г., стр. 269 и след.

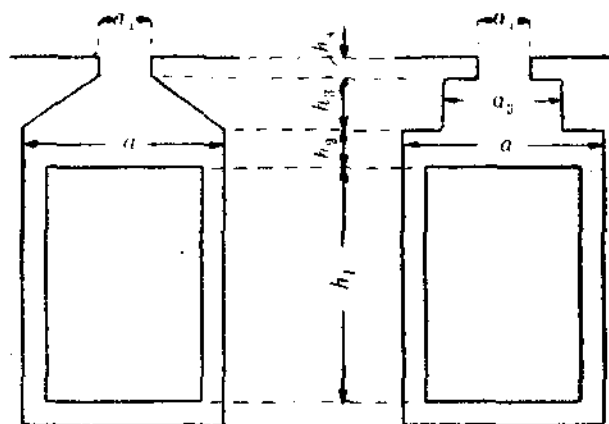
³⁾ Loco cit., стр. 277.

Для овальных впадин, как на фиг. 70,

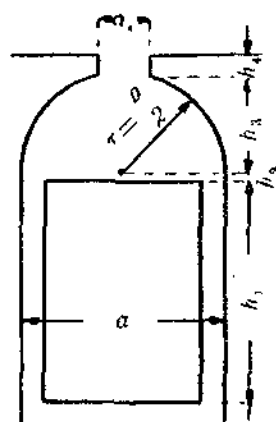
$$\lambda_n = k_1 \cdot \frac{h_1}{3a} + 0,66 + \frac{h_4}{a_4} \quad (136)$$

Для круглых впадин (фиг. 71)

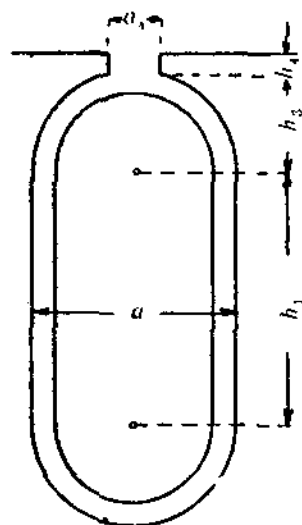
$$\lambda_n = 0,66 + \frac{h_4}{a_4} \quad (137)$$



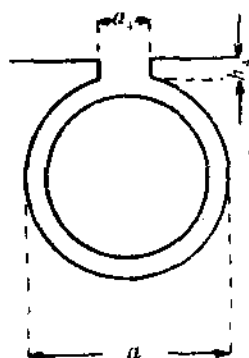
Фиг. 68.



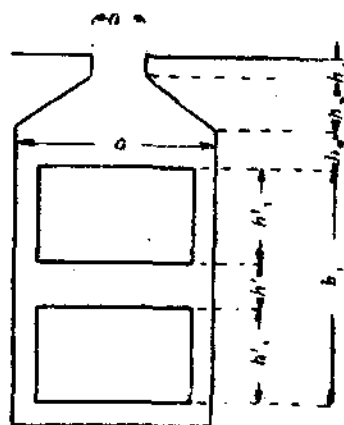
Фиг. 69.



Фиг. 70.



Фиг. 71.



Фиг. 72.

Для двухслойной обмотки в уравнение (133) вместо коэффициента проводимости λ_n нужно подставить величину суммарного коэффициента λ_n' , учитывающего неодинаковость проводимостей для верхнего и нижнего слоя¹⁾. Для обыкновенных двухслойных обмоток переменного тока практически можно считать $\lambda_n' = \lambda_n$ и определять его по приведенным выше формулам, приняв, что (фиг. 72)

$$h_1 = 2h_1' + h' \quad (138)$$

¹⁾ Loco cit., стр. 272.

Для однофазной обмотки постоянного тока, с числом параллельных ветвей $= 2a_1$, полным числом проводников $= z_1$ и числом впадин $= u_1$,

$$w_1 = \frac{z_1}{4a_1} \quad \text{и} \quad q_1 = \frac{u_1}{2p}$$

Тогда

$$x_n = 0,079 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{z_1}{100 \cdot 2a_1} \right)^2 \cdot \frac{l_i}{u_1} \cdot \lambda_n' \dots \dots \dots (139)$$

Для этих обмоток

$$\lambda_n' = \lambda_n - \frac{h'}{12a} \dots \dots \dots (140)$$

Для m_1 -фазной обмотки постоянного тока, для одной фазы

$$w_1 = \frac{z_1}{2a_1 m_1} \quad \text{и} \quad q_1 = \frac{u_1}{2p m_1}$$

Тогда

$$x_n = \frac{0,316}{m_1} \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{z_1}{100 \cdot 2a_1} \right)^2 \cdot \frac{l_i}{u_1} \cdot \lambda_n' \dots \dots \dots (141)$$

где

$$\lambda_n' = \frac{3}{4} \lambda_n + \frac{h'}{24a} \dots \dots \dots (142)$$

б) Определение индуктивного сопротивления x_p . Для однослойных обмоток величину x_p можно получить, если в уравнение (133) для x_n подставить вместо λ_n средний коэффициент проводимости для зубцовых головок $\lambda_k^{(1)}$.

Тогда

$$x_p = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_i}{p} \cdot \frac{\lambda_k}{q_1} \dots \dots \dots (143)$$

Для статора (фиг. 73)

$$\lambda_{k1} = \frac{[l''_{s\max} - 0,75(a_{d1} + a_{dr})]^2}{6 \cdot l''_{s\max} \cdot \delta} \dots \dots \dots (144)$$

где $l''_{s\max}$ — зубцовый шаг ротора на его поверхности.

Для двухслойной обмотки

$$x_p = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_i}{p} \cdot \frac{\lambda_k}{q_1} \cdot \frac{(1+g)}{2} \dots \dots \dots (145)$$

где

$$g = \cos \frac{\pi}{m_1} \dots \dots \dots (146)$$

Для однофазной двухслойной обмотки $g = 1$.

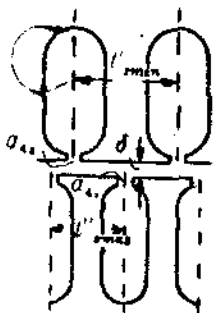
Для трехфазной двухслойной обмотки $g = 0,5$.

γ) Определение индуктивного сопротивления x_s . Аналогично величинам x_n и x_p индуктивное сопротивление x_s можно представить выражением

$$x_s = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{s1}}{p} \cdot \lambda_s \dots \dots \dots (147)$$

где l_{s1} — средняя длина одного лобового соединения, равная около $1,4\tau + \frac{1}{2}(3+8) \text{ см}$.

¹⁾ Мы говорим о среднем коэффициенте проводимости, так как взаимное положение зубцов статора и ротора все время меняется, а вместе с тем меняется и магнитная проводимость.



Фиг. 73.

Коэффициент проводимости имеет значения:

для однофазных обмоток, в среднем	$\lambda_s = 0,15$
для трехфазных обмоток, лобовые соединения которых лежат в трех плоскостях, в среднем	$\lambda_s = 0,225$
для трехфазных обмоток, лобовые соединения которых лежат в двух плоскостях, в среднем	$\lambda_s = 0,3$
для трехфазных обмоток, с витыми лобовыми соединениями, в среднем	$\lambda_s = 0,25$
для однофазной обмотки постоянного тока, в среднем	$\lambda_s = 0,09$
для трехфазной обмотки постоянного тока, в среднем	$\lambda_s = 0,18$
для шестифазной обмотки постоянного тока, в среднем	$\lambda_s = 0,29$

Относительно определения x_d будет сказано в § 2 этой главы.

б) Обмотка ротора.

а) Обмотка с кольцами. Индуктивное сопротивление обмотки с кольцами определяется по тем же формулам, что и для статорной обмотки, т.е.

$$x_2 = x_n + x_p + x_s + x_d,$$

где x_n , x_p , x_s определяются так же как и для статора¹⁾.

Исключение составляет уравнение (144), которое для роторной обмотки примет вид

$$\lambda_{s2} = \frac{[l'_{z \min} - 0,75(a_{s2} + a_{s1})]^2}{6 \cdot l'_{s2 \min} \cdot \delta}, \dots (148)$$

где $l'_{z \min}$ — зубцовый шаг статора на его внутренней поверхности.

б) Короткозамкнутая обмотка. По Arnold'y²⁾ индуктивное сопротивление обмотки в виде беличьего колеса

$$x_2 = \frac{\pi \cdot f \cdot l_l}{p} \left[\lambda_n + \lambda_s + \frac{l_{s2}}{l_l} \cdot \frac{2\lambda_s}{\left(2 \sin \frac{\pi p}{z_s}\right)^2} \right] \cdot 10^{-9}, \dots (149)$$

где λ_n и λ_s определяются, как и раньше, величина λ_s составляет

$$\lambda_s = 0,46 \cdot \lg \frac{1,5 \cdot \pi \cdot D_r}{2(a_r + b_r)} \dots (150)$$

а величина l_{s2}

$$l_{s2} = \frac{\pi D_r}{u_2} \dots (151)$$

В уравнении (150)

a_r — ширина кольца (по оси машины),

b_r — толщина кольца (по радиусу).

¹⁾ Конечно, все размеры должны браться по зубцам ротора и, кроме того, в уравнении (147) величина l_{s2} будет равна:
для малых двигателей

$$l_{s2} = 1,2 \tau + (1 \div 4) \text{ см}$$

для больших двигателей

$$l_{s2} = 1,3 \tau + (3 \div 6) \text{ см.}$$

²⁾ Arnold—Wechselstromtechnik, т. V, 1 стр. 57, 58.

2. Двойное рассеяние.

Как мы уже говорили, к индуктивному сопротивлению обмотки, вызываемому рассеянием во впадинах, между головками зубцов и вокруг лобовых соединений, добавляется еще индуктивное сопротивление, вызываемое двойным рассеянием, т.е. неодинаковым сцеплением силовых линий магнитного потока с обмотками статора и ротора.

До сих пор при определении величины ЭДС мы пользовались обмоточными коэффициентами f_1 и f_2 , выведенными в предположении синусоидального распределения магнитного потока. Однако, такое распределение имеет место лишь при числе впадин на полюс и фазу $= \infty$. В обычных же условиях магнитное поле будет распределяться не по синусоиде, а по ступенчатой кривой¹⁾. Вышеприведенный способ был достаточно точен, пока требовалось определять абсолютные значения ЭДС, наводимых вращающимся потоком в обмотке статора и ротора. Однако, при определении двойного рассеяния нам приходится иметь дело с разностью ЭДС, которая уже в значительной степени зависит от распределения магнитного потока и от способа сцепления силовых линий с витками обмоток. Поэтому нам придется в наши формулы ввести истинные обмоточные коэффициенты²⁾, значения которых приведены в помещаемой здесь таблице. В отличие от коэффициентов f_1 и f_2 мы будем обозначать их f_{11} и f_{22} .

Обмотки трехфазного тока.

Число впадин на полюс и фазу q_1 или q_2	1	2	3	4	5	6	∞
f_{11} или f_{22}	1	1	0,9583	0,9643	0,9546	0,9577	0,9524

Кроме ЭДС, наводимых в обмотке статора или ротора своим же магнитным потоком (самоиндукция), в обмотке статора индуцируется ЭДС потоком ротора и наоборот, поток статора наводит ЭДС в обмотке ротора (взаимоиндукция).

Теория учит, что даже при одинаковых обмотках статора и ротора один и тот же поток наводит в них различные ЭДС. Происходит это вследствие неодинакового сцепления силовых линий с витками обмоток. При наличии потока Φ в статоре наводится ЭДС

$$E_1' = 2,22 \cdot f \cdot f_{11} \cdot z_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8}, \dots \dots \dots (152)$$

а в роторе (если его привести к числу периодов и числу витков статора)

$$(E_2')' = 2,22 \cdot f \cdot f_{12} \cdot z_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8}, \dots \dots \dots (153)$$

где f_{12} — взаимный обмоточный коэффициент статора на ротор, который может быть взят из следующей таблицы.

Статор и ротор имеют трехфазную обмотку.

Обмотка, индуцирующая ЭДС	q	1	2	3	4	5	6	∞
Обмотка, в которой индуцируется ЭДС	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0,8750	1	0,9531	0,9643	0,9602	0,9683	0,9643
	3	0,8889	0,9683	0,9583	0,9603	0,9546	0,9577	0,9418
	4	0,8750	0,9643	0,9453	0,9643	0,9517	0,9564	0,9554
	5	0,8800	0,9657	0,9450	0,9571	0,9546	0,9556	0,9543
	6	0,8750	0,9683	0,9427	0,9564	0,9501	0,9577	0,9537
	∞	0,8750	0,9643	0,9271	0,9554	0,9487	0,9538	0,9524

¹⁾ См., напр., Arnold.—Wechselstromtechnik, т. III.

²⁾ Вывод формул для этих коэффициентов можно найти в учебниках, рассматривающих теорию асинхронных двигателей.

Разность этих ЭДС, приведенных к одному числу проводов

$$E_{d1} = E_1' - (E_2')' = 2,22 \cdot f \cdot z_1 (f_{11} - f_{12}) \cdot \Phi \cdot 10^{-8}, \dots (154)$$

и определяет потерю напряжения в обмотке статора вследствие двойного рассеяния.

В случае, если ротор имеет короткозамкнутую обмотку, для которой $f_{12} = 1$, мы имеем в роторе более полное сцепление силовых линий, так как через каждый виток проходит весь магнитный поток, и поэтому разность $E_1' - (E_2')'$ будет иметь отрицательную величину, т.е. при наличии короткозамкнутой обмотки рассеяние в статоре уменьшается.

Добавочное индуктивное сопротивление обмотки статора, вызываемое двойным рассеянием, будет

$$x_{d1} = \frac{E_{d1}}{I_{01}} \dots (155)$$

Повторяя те же рассуждения для обмотки ротора, найдем, что в роторе под влиянием потока Φ наводится ЭДС¹⁾

$$E_2' = 2,22 \cdot f \cdot f_{22} \cdot z_2 \cdot \Phi \cdot 10^{-8}, \dots (156)$$

а в статоре (если его привести к числу периодов и числу витков ротора)

$$(E_1')'' = 2,22 \cdot f \cdot f_{21} \cdot z_2 \cdot \Phi \cdot 10^{-8}, \dots (157)$$

где f_{21} — взаимный обмоточный коэффициент ротора на статор — берется из той же таблицы, что и f_{12} .

Разность этих ЭДС, приведенных к одному числу проводов

$$E_{d2} = E_2' - (E_1')'' = 2,22 \cdot f \cdot z_2 (f_{22} - f_{21}) \Phi \cdot 10^{-8}, \dots (158)$$

дает потерю напряжения в обмотке ротора вследствие двойного рассеяния. *

Соответствующее индуктивное сопротивление ротора:

для многофазного двигателя

$$x_{d2} = \frac{E_{d2}}{I_{01} \left(\frac{m_1 \cdot f_1 \cdot w_1}{m_2 \cdot f_2 \cdot w_2} \right)} \dots (159)$$

для однофазного двигателя

$$x_{d2} = \frac{E_{d2}}{I_{01} \left(\frac{f_1 \cdot w_1}{2 \cdot f_2 \cdot w_2} \right)} \dots (159a)$$

Здесь

$$I_{01} \cdot \frac{m_1 \cdot f_1 \cdot w_1}{m_2 \cdot f_2 \cdot w_2} \quad \text{и} \quad I_{01} \cdot \frac{f_1 \cdot w_1}{2 \cdot f_2 \cdot w_2}$$

ток холостого хода статора, приведенный к числу фаз и проводов ротора.

Для однофазных двигателей ЭДС двойного рассеяния практически можно определять так же, как и для трехфазных, если считать, что рабочая обмотка статора состоит из двух фаз, для каждой из которых число впадин на полюс и фазу составляет

$$\frac{Q_1}{3} = \frac{q_1}{2}.$$

Тогда коэффициенты f_{11} , f_{22} , f_{12} , f_{21} можно брать из таблицы для трехфазных обмоток, для значений:

в статоре

$$q = \frac{q_1}{2},$$

в роторе

$$q = q_2.$$

¹⁾ Условимся определять ЭДС при холостом ходе, тогда поток статора = поток ротора = Φ .

3. Индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Индуктивным сопротивлением короткого замыкания называется выражение:

для трехфазных двигателей

$$x_k = x_1 + x_2' \quad (160)$$

для однофазных двигателей

$$x_k = x + 2x_2', \quad (160a)$$

где x_2' — приведенное к числу витков статора индуктивное сопротивление одной фазы ротора:

для многофазного двигателя

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{m_2 \cdot w_1^2 \cdot f_1^2}{m_1 \cdot w_2^2 \cdot f_2^2} \quad (161)$$

для однофазного двигателя

$$x_2' = x \cdot \frac{w_1^2 \cdot f_1^2}{4w_2^2 \cdot f_2^2} \quad (161a)$$

Для ротора с обмоткой в виде беличьего колеса, аналогично уравнению (97), имеем

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot p \cdot m_1 \cdot w_1^2 \cdot f_1^2}{z_2} \quad (162)$$

4. Полное сопротивление короткого замыкания, ток короткого замыкания и $\cos \varphi_k$.

Полным сопротивлением короткого замыкания называется геометрическая сумма эффективного и индуктивного сопротивлений короткого замыкания, т.-е. величина

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} \quad (163)$$

Сила тока короткого замыкания

$$I_k = \frac{E_1}{z_k} \quad (164)$$

Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k} \quad (165)$$

По „Нормам Союза германских электротехников“, способность моторов к перегрузке должна быть от 1,6 до 2,5, а по ОСТ 678 и ОСТ 679 она должна составлять от 1,8 до 2, т.-е. мотор, работающий при постоянном напряжении, должен останавливаться лишь при нагрузке, равной от 1,6 до 2,5 и соответственно от 1,8 до 2 нормальной¹⁾. По Arnold'у для перегрузки, равной 2, должно быть

$$\frac{I_k}{I_1} \cong 4 \quad (166)$$

С другой стороны, для того чтобы $\cos \varphi$ был больше 0,9, необходимо соблюдение условия

$$\frac{I_M}{I_1} \cong 4,35, \quad (167)$$

где

$$I_M = \frac{E_1}{x_k} \quad (168)$$

называется идеальным током короткого замыкания. Такой случай имел бы место, если бы $r_k = 0$, т.-е. обмотки не обладали бы омическим сопротивлением.

¹⁾ Значения коэффициентов перегрузки для различных типов двигателей см. гл. V, 7.

Для моторов с короткозамкнутым ротором, пусковой ток, при включении на полное рабочее напряжение, будет

$$\frac{E_1}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}} = \frac{E_1}{z_k} \dots \dots \dots (169)$$

По „Нормам союза германских электротехников“ пусковой ток не должен превышать величину нормального рабочего тока более, чем в K_1 раз, при чем величина K_1 указана в приводимой таблице в зависимости от мощности и числа оборотов двигателя. В этой же таблице дан коэффициент K_2 , который, будучи умножен на нормальный вращающий момент, дает минимальную величину начального вращающего момента, допустимого для данного двигателя.

Номинальная мощность kW	K_2 для числа оборотов	K_1 для числа оборотов		
	3 000 ÷ 500	3 000 и 1 500	1 000 и 750	600 и 500
0,125 ÷ 1	2	6,4	5,6	—
1,5 ÷ 3,5	1,6	7,2	6,4	—
5 ÷ 15	1,25	7,2	6,4	5
20 ÷ 50	1	8	7,2	5,6
75 ÷ 100	1	8	7,2	6,4

По ОСТ 678, значения K_1 и K_2 должны иметь следующие величины:

Номинальная мощность kW	K_2 для числа оборотов	K_1 для числа оборотов	
	3 000 ÷ 600	3 000 до 1 000	750 до 600
0,1 ÷ 1	1,7	6,5	5,5
1,75 ÷ 4,5	1,5	7	6
6,8 ÷ 14,5	1,3	7	6
20,5 ÷ 40	1	7,5	6,5
29 ÷ 100	0,8	—	—

Если пусковой ток (лежащий в этих пределах) все же настолько велик, что может вызвать колебания напряжения в питающей сети, то мотор пускают с помощью переключателя со звезды на треугольник (при этом пусковой ток и начальный момент уменьшаются в 3 раза) или, для средних и больших моторов, с помощью пускового трансформатора, включаемого в цепь статора. Заметим, что для пуска мотора вхолостую требуется момент, равный около 25% нормального.

ГЛАВА V.

Потери и ток холостого хода.

1. Потери на гистерезис.

Потери на гистерезис обусловлены в асинхронных двигателях циклическим (и отчасти переменным) перемагничиванием, совершающимся с частотой для статора

$$f = \frac{pn_s}{60} \dots \dots \dots (170)$$

и для ротора

$$sf = sn_s \cdot \frac{p}{60}, \dots \dots \dots (171)$$

где скольжение ротора

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \dots \dots \dots (172)$$

здесь n_s — число оборотов вращающегося магнитного поля (синхронное число оборотов),

n_r — действительное число оборотов ротора.

Подставляя (172) в (171), получим

$$sf = (n_s - n_r) \cdot \frac{p}{60} \dots \dots \dots (173)$$

Так как разность $(n_s - n_r)$ для асинхронных двигателей очень мала, то и частота sf также будет незначительной.

Steinmetz нашел, что для переменного перемагничивания потери на гистерезис выражаются эмпирической формулой

$$W_h = \eta \cdot f \cdot B^{1.6} \text{ эрг/см}^3,$$

где η — постоянная, зависящая от сорта железа.

Однако, как показали позднейшие исследования Richter'a¹⁾, эта формула, помимо неудобства при вычислениях (наличие 1,6-й степени), дает при $B > 10\,000$ неточные результаты. По Richter'у потеря на гистерезис выражается формулой

$$W_h = f(\alpha' B + \beta' B^2).$$

Для практического применения эта формула получает вид

$$W_h = \alpha \cdot \frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10\,000} + \beta \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{B}{10\,000} \right)^2 \text{ W/kg.} \dots \dots \dots (174)$$

Числовые значения α и β для различных сортов железа указаны в таблице, помещенной на стр. 112.

Для индукций, встречающихся в современных машинах, первый член уравнения (174) настолько мал по сравнению со вторым, что им можно пренебречь и считать потерю на гистерезис равной

$$W_h = \epsilon \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{B}{10\,000} \right)^2 \text{ W/kg.} \dots \dots \dots (175)$$

где коэффициент ϵ находится из условия совпадения потерь, вычисленных по уравнениям (174) и (175) для $B = 10\,000$.

Величина ϵ также указана в таблице на стр. 112.

Так как частота перемагничивания в роторе имеет, как мы видели [(уравнение (173))], очень малую величину, то потерями на гистерезис для ротора можно пренебречь.

¹⁾ ETZ, 1910, стр. 1241.

а) Тело статора.

В теле статора перемагничивание будет по преимуществу циклическим. Как показывают многочисленные исследования Schenkel¹⁾, Vallauri²⁾, Gans-Loyarte³⁾ и др., при циклическом перемагничивании потери на гистерезис значительно больше, чем при переменном, для которого найдено уравнение (175).

Для определения потерь на гистерезис в теле статора мы будем, как и для расчета магнитной цепи (гл. III, 8), пользоваться средней индукцией, которая при синусоидальном распределении будет равна

$$(B_{a1})_{cp} = \frac{2}{\pi} B_{a1} = 0,637 \cdot B_{a1} \quad (176)$$

Тогда потеря на гистерезис для тела статора будет составлять

$$(W_h)_{as} = k_h \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{0,637 \cdot B_{a1}}{10000} \right)^2 \cdot G_{as} \cdot W \quad (177)$$

Здесь k_h — коэффициент, учитывающий увеличение потерь вследствие циклического, а не переменного перемагничивания, и влияние обработки⁴⁾. В среднем, для статоров асинхронных двигателей можно принять $k_h \approx 2$.

G_{as} — вес в kg железных листов, составляющих тело статора (за вычетом зубцов). Принимая удельный вес железа $\gamma_e = 7,8 \text{ g/cm}^3$, найдем, что

$$\begin{aligned} G_{as} &= \pi \cdot \gamma_e \cdot l_0 \left[\left(\frac{D}{2} + h_{n1} + h_s \right)^2 - \left(\frac{D}{2} + h_{n1} \right)^2 \right] \cdot 10^{-3} = \\ &= 24,5 \cdot l_0 \cdot h_s (D + 2h_{n1} + h_s) \cdot 10^{-3} \text{ kg} \end{aligned} \quad (178)$$

б) Зубцы статора.

В зубцах имеет место почти чистое переменное перемагничивание. Строго говоря, мы должны были бы вести расчет, принимая во внимание неравномерное распределение индукции по длине зуба.

Индукция в каком-либо месте зубца статора

$$B_x = \frac{B_1 \cdot l_1 \cdot l_{x \min}}{l_0 \cdot Z_x} \quad (179)$$

(Длину мы отсчитываем от вершины зубца, т.-е. при $Z_{\min}$ и $B_{s \max}$ будет $x=0$, а при $Z_{\max}$ и $B_{s \min}$, $x = h_{n1}$).

Вес зубцов в той части, которая соответствует длине x , будет

$$G_{z1} = \gamma_e \cdot l_0 \cdot x [(D+x) - \pi b_{n1}] \cdot 10^{-3} \text{ kg} \quad (180)$$

Ширина зубца Z_x может быть выражена через $Z_{\max}$ и $Z_{\min}$ следующим образом:

$$Z_x = Z_{\min} + \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{h_{n1}} \cdot x \quad (181)$$

¹⁾ ETZ, 1902, стр. 429.

²⁾ E и M, 1911, стр. 811.

³⁾ Archiv f. El., т. 3, стр. 139.

⁴⁾ Влияние обработки сказывается в том, что штампованные листы обладают всегда заусенцами, которые, давая местные короткие замыкания между изолированными листами, увеличивают магнитные потери.

Подставляя в формулу потерь на гистерезис

$$(W_h)_{zs} = k_h \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{B_s}{10\,000} \right)^2 \cdot G_{zs}$$

найденные значения B_s и G_{zs} и принимая во внимание уравнение (181), получим

$$(W_h)_{zs} = k_h \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{B_i}{10\,000} \right)^2 \cdot \frac{l_i^2 (l'_{s\,min})^2}{l_0^3} \cdot h_{n1}^2 \cdot \gamma_e \cdot l_0 \cdot 10^{-3} \int_{x=0}^{x=h_{n1}} \frac{\pi x^2 + (D\pi - ub_{n1})x}{[h_{n1} Z_{min} + (Z_{max} - Z_{min})x]^2} \cdot dx.$$

После интегрирования и приведения мы получаем

$$(W_h)_{zs} = k_h \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{B_i}{10\,000} \right)^2 \cdot \frac{l_i^2 (l'_{s\,min})^2}{l_0^3} \cdot h_{n1} \cdot \gamma_e \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{Z_{max} - Z_{min}} \cdot \left[\frac{1}{Z_{max} - Z_{min}} \cdot \ln \frac{Z_{max}}{Z_{min}} \left(\frac{2\pi \cdot h_{n1} Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}} + \pi D - ub_{n1} \right) + \frac{1}{Z_{max}} (\pi h_{n1} - \pi D + ub_{n1}) \right] W \quad (182)$$

При сравнительной неточности определения магнитных потерь, пользоваться этим сложным выражением нет, конечно, никакого смысла. Практически вполне допустимо считать, что удельные потери на гистерезис не изменяются вдоль длины зуба, и расчет их можно вести по средней индукции B_{scp} (см. гл. III, 6). При этом найденные потери будут несколько меньше действительных, но даже при отношении¹⁾

$$\frac{Z_{max}}{Z_{min}} = 3$$

ошибка меньше 10%.

Таким образом потерю на гистерезис в зубцах можно определить по формуле

$$(W_h)_{zs} = k_h \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{B_{scp}}{10\,000} \right)^2 G_{zs} \quad (183)$$

где k_h для зубцов может быть принято равным 1,2,

G_{zs} — вес зубцов, равный

$$\begin{aligned} G_{zs} &= \gamma_e \cdot l_0 \cdot h_{n1} [(D + h_{n1})\pi - u_1 b_{n1}] \cdot 10^{-3} = \\ &= 7,8 \cdot l_0 \cdot h_{n1} [(D + h_{n1})\pi - u_1 b_{n1}] \cdot 10^{-3} \text{ кг} \end{aligned} \quad (184)$$

2. Потери на токи Фуко.

Потери эти вызываются токами, индуцируемыми в железе при его перемагничивании. Чтобы уменьшить эти потери, те части машины, которые подвергаются перемагничиванию, изготавливаются из тонких отдельных листов, плоскости которых расположены параллельно силовым линиям. Легко можно вывести²⁾, что потери на токи Фуко имеют величину

$$W_f = \frac{4}{3\rho} \left(\Delta \cdot \frac{f}{100} \cdot \xi_e \cdot \frac{B}{10\,000} \right)^2 W/cm^3 \quad (185)$$

Здесь ρ — удельное сопротивление железа в $\Omega \text{ mm}^2/m$,

Δ — толщина железа в cm ,

ξ_e — коэффициент формы индуцируемой ЭДС, равный при синусоидальном изменении индукции 1,11.

¹⁾ Ошибка будет тем меньше, чем меньше отношение $Z_{max}:Z_{min}$.

²⁾ См., напр., R. Richter—Elektrische Maschinen, т. I, 1924 г., стр. 153.

Для определения сорта железа определенной толщины можно написать

$$W_f = \sigma_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B}{10\,000} \right)^2 W / \text{kg}, \quad \dots \dots \dots (186)$$

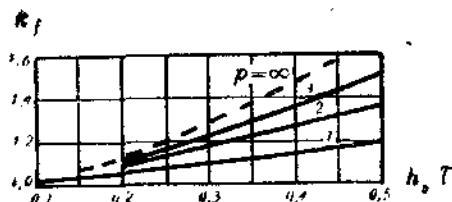
где σ_f — постоянная, значения которой даны в таблице стр. 112.

Как и потери на гистерезис, так и потери на токи Фуко в роторе вследствие малой частоты имеют весьма небольшую величину и при расчете асинхронных двигателей ими можно пренебречь.

а) Тело статора.

При выводе уравнений (185) и (186) было предположено, что магнитное поле однородно и что имеет место лишь переменное перемагничивание. Однако, в теле статора асинхронного двигателя оба эти предположения не осуществлены, и поэтому для этого случая необходимо вводить некоторую поправку.

Силовые линии распределены в статоре неравномерно, и эта неравномерность так же, как и влияние ее на величину потерь, зависит от числа полюсов и от отношения $h_s : \tau$ между радиальной шириной остова и полюсным делением. На практике, в большинстве случаев, это отношение лежит в границах



Фиг. 74.

$$0,2 \leq \frac{h_s}{\tau} \leq 0,4 \quad \dots \dots \dots (187)$$

Таким образом, потеря на токи Фуко в теле статора будет составлять

$$(W_f)_{st} = k_f \cdot \sigma_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{0,637 \cdot B_{a1}}{10\,000} \right)^2 \cdot G_{st} W, \quad \dots \dots \dots (188)$$

где k_f — коэффициент, учитывающий неравномерность поля; значения k_f могут быть взяты по кривым фиг. 74 в зависимости от числа пар полюсов и отношения $h_s : \tau$;

$0,637 \cdot B_{a1} = \frac{2}{\pi} B_{a1}$ — средняя величина индукции в теле статора;

G_{st} — вес тела статора [см. уравнение (178)].

б) Зубцы статора.

При выводе уравнений (185) и (186) было предположено, что ширина листа по сравнению с его толщиной весьма велика. Это условие в случае зубцов, однако, не всегда соблюдается, и для очень узких зубцов отношение

$$x = \frac{Z_{min}}{\Delta} \quad \dots \dots \dots (189)$$

может упасть до 6. Поэтому действительная величина потерь на токи Фуко может быть меньше найденной расчетом. Так как, однако, мы ведем расчет по средней индукции B_{a1} , дающей несколько преуменьшенные результаты, то обе эти неточности друг друга компенсируют.

При определении потерь на токи Фуко в зубцах не следует упускать из вида, что вследствие большого насыщения форма кривой магнитной индукции может здесь значительно отличаться от синусоиды. Поэтому в уравнение приходится вводить

поправочный коэффициент k_f , который, если известна форма кривой, может быть найден по уравнению

$$k_f = \frac{B_1^2 + 4B_2^2 + 9B_3^2 + \dots}{B^2}, \dots \dots \dots (190)$$

где B_1, B_2, B_3 — амплитуды основной синусоиды и высших гармонических, а B — амплитуда эквивалентной синусоиды. В среднем для асинхронных двигателей можно считать $k_f = 1,5$.

Тогда потеря на токи Фуко в зубцах

$$(W_f)_{zs} = k_f \cdot \sigma_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B_{\text{ср}}}{10\,000} \right)^2 \cdot G_{zs}, \dots \dots \dots (191)$$

где G_{zs} определяется по уравнению (184).

Коэффициенты, входящие в формулы для расчета потерь на гистерезис (α, β, ϵ) и на токи Фуко (σ_f), в зависимости от сорта железа и толщины листов, имеют следующие значения.

Сорт железа	Толщина в <i>mm</i>	α	β	ϵ	σ_f
Обыкновенное динам- ное железо	1,0	0,9	3,5	4,4	22,4
	0,5	0,9	3,5	4,4	5,6
	0,35	0,9	3,8	4,7	3,2
Высоколегированное железо	0,5	0,4	2,8	3,0	1,2
	0,35	0,3	2,1	2,4	0,6

3. Добавочные потери в железе.

Кроме потерь на гистерезис и токи Фуко в асинхронных двигателях возникают еще так называемые добавочные потери в железе вследствие пульсации магнитного поля. Эти потери делятся на поверхностные потери и потери пульсационные.

а) Поверхностные потери.

Если мы представим себе сперва, что впадины имеются лишь на роторе двигателя, а статор выполнен гладким, то при вращении ротора индукция на поверхности статора будет колебаться между значениями B_{max} (в средней плоскости зубца) и B_{min} (в средней плоскости впадины). Эти колебания, совершающиеся с частотой

$$f_n = \frac{u_2 n_2}{60},$$

налагаются на основную волну магнитной индукции и вызывают в железе статора токи Фуко. Однако, эти токи, благодаря большой частоте, не проникают глубоко в железо статора, а располагаются на его поверхности, благодаря чему и обусловленные ими потери называются *поверхностными* (нем. *Oberflächenverluste*).

Величина этих потерь на 1 м^2 поверхности статора может быть выражена формулой ¹⁾

$$(W_o')_s = \frac{1}{2} \cdot k_{os} \left(\frac{u_2 \cdot n_2}{10\,000} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{\ell''_{\text{max}} \cdot \beta_2 \cdot k_{es} \cdot B_l}{1\,000} \right)^2 \text{ W/m}^2 \dots \dots \dots (192)$$

Здесь k_{os} — коэффициент, зависящий от толщины железа статора (для $\Delta = 0,5\text{ mm}$ можно принимать $k_{os} = 2,7$);

u_2 — число впадин ротора;

¹⁾ См. Richter—Elektrische Maschinen, т. 1, 1924 г., стр. 214.

β_1 — коэффициент, учитывающий несинусоидальность поля, вызываемого зубцами, который может быть в зависимости от отношения ширины щели роторной впадины (фиг. 52) к воздушному промежутку ($a_{gr} : \delta$) взят из таблицы.

$\frac{a_g}{\delta}$	β	$\frac{a_g}{\delta}$	β	$\frac{a_g}{\delta}$	β
0	0	3,0	0,2226	8,0	0,3787
0,5	0,0149	4,0	0,2764	10,0	0,4019
1,0	0,0328	5,0	0,3143	12,0	0,4178
1,5	0,1000	6,0	0,3419	40,0	0,4750
2,0	0,1484	7,0	0,3628	∞	0,5000

k_{ss} — коэффициент, также учитывающий форму поля зубцов, который для употребительных значений

$$2 \leq \frac{a_{gr}}{\delta} \leq 12 \dots \dots \dots (193)$$

может быть найден по формуле

$$k_{ss} = \frac{t''_{s \max}}{t''_{s \max} + \delta - \frac{3}{4} a_{gr}} \dots \dots \dots (194)$$

Так как статор асинхронных двигателей в действительности также имеет зубцы, то действительные потери на его поверхности будут меньше, ибо образование токов Фуко будет более или менее затрудняться наличием щелей. Однако, ширина этих щелей настолько мала по сравнению с шириной зубца, что этим уменьшением потерь можно пренебречь. Умножая удельную потерю (192) на поверхность зубцов статора

$$O_{ss} = \pi D \cdot (l - bL) \frac{t'_{s \min} - a_{ss}}{t'_{s \min}} \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \dots \dots \dots (195)$$

мы получим полную поверхностную потерю статора

$$(W_o)_s = \pi D (l - \delta L) \frac{t'_{s \min} - a_{ss}}{t'_{s \min}} \cdot \frac{1}{2} k_{or} \left(\frac{u_s n_s}{1000} \right)^{1,5} \left(\frac{t''_{s \max} \cdot \beta_1 \cdot k_{ss} \cdot B_l}{1000} \right) 10^{-4} \text{ W.} (196)$$

Со своей стороны, колебания индукции, вызываемые зубцами статора, дают поверхностную потерю в роторе, которая может быть аналогично (196) выражена формулой

$$(W_o)_r = \pi (D - 2\delta) (l - bL) \frac{t''_{s \max} - a_{gr}}{t''_{s \max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot k_{or} \cdot \left(\frac{u_s n_s}{1000} \right)^{1,5} \left\{ \left(\frac{t'_{s \min} \cdot \beta_1 \cdot k_{gr} \cdot B_l}{1000} \right)^2 \cdot 10^{-4} \text{ W} \right\} \dots \dots (197)$$

Здесь

$$k_{os} = k_{or} \approx 2,7$$

$\beta_1 = f\left(\frac{a_{ss}}{\delta}\right)$ берется из вышеприведенной таблицы

$$k_{gr} = \frac{t'_{s \min}}{t'_{s \min} + \delta - \frac{3}{4} a_{ss}}.$$

б) Пульсационные потери.

Для асинхронных двигателей индукция в зубцах зависит от относительного положения зубцов статора и ротора. Она колеблется в зубцах ротора с частотой, пропорциональной числу впадин статора, и наоборот. Частота этих колебаний, таким образом для статора

$$\left. \begin{aligned} f_s &= u_2 \frac{n_s}{60} \\ f_r &= u_1 \frac{n_s}{60} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (198)$$

для ротора

Амплитуда этих колебаний, налагающихся на среднюю индукцию ($B_{\text{ст ср}}$), зависит, как мы уже сказали, от взаимного расположения зубцов. Для имеющего место на практике случая, когда статор и ротор имеют зубцы различной ширины ($u_1 \geq u_2$), эта амплитуда, напр., для статора, будет выражаться формулой ¹⁾

$$(B_p)_1 \approx \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2l''_{\text{ст min}}} (B_{\text{ст ср}})_1 \dots \dots \dots (199)$$

где

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{a_{\text{ст}}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_{\text{ст}}}{\delta}} \dots \dots \dots (200)$$

Полная потеря в зубцах статора вследствие пульсации индукции может быть для железа, толщиной 0,5 *mm*, найдена по формуле ²⁾

$$(W_p)_s = 0,14 \left[\frac{u_2 \cdot n_s}{10000} \cdot \frac{(B_p)_1}{1000} \right]^2 G_{\text{ст}} W \dots \dots \dots (201)$$

Подобным же образом для ротора

$$(B_p)_2 \approx \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2l''_{\text{р max}}} (B_{\text{ст ср}})_2 \dots \dots \dots (199a)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{a_{\text{р}}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_{\text{р}}}{\delta}} \dots \dots \dots (200a)$$

$$(W_p)_r = 0,14 \left[\frac{u_1 \cdot n_s}{10000} \cdot \frac{(B_p)_2}{1000} \right]^2 G_{\text{р}} W \dots \dots \dots (202)$$

где вес зубцов ротора

$$G_{\text{р}} = 7,8 \cdot l_0 \cdot h_{\text{н2}} [(D - 2\delta - h_{\text{н2}}) \pi - u_2 b_{\text{н2}}] \cdot 10^{-3} \text{ кг} \dots \dots (203)$$

4. Потери на трение.

а) Контактные кольца.

Эта потеря существует, конечно, лишь в двигателях, имеющих ротор с кольцами ³⁾, и обусловлена трением щеток о поверхность колец.

Обозначим

p_k — удельное нажатие щеток в *kg/cm²*;

f_0 — коэффициент трения между щетками и кольцами;

F_B — поверхность прилегания всех щеток в *cm²*;

v_k — окружная скорость на поверхности колец $\approx \frac{\pi D_k n_s}{60}$ в *m/сек.* (D_k — диаметр колец в *m*).

¹⁾ Вывод см. Richter. — Elektrische Maschinen, т. I, 1924 г., стр. 221.

²⁾ Richter. — Elektrische Maschinen, т. I, стр. 229.

³⁾ И, притом, лишь в двигателях, в которых нет приспособления для короткого замыкания обмотки ротора и подъема щеток.

Тогда потеря трения

$$(W_r)_k = p_k \cdot F_B \cdot f_b \cdot v_k \text{ mkg/сек.}$$

или

$$(W_r)_k = 9,81 \cdot p_k \cdot F_B \cdot f_b \cdot v_k W \dots \dots \dots (204)$$

Величины p_k и f_b для данного сорта щеток берутся из таблиц, приведенных в гл. II, 10.

б) Подшипники.

Для определения потери на трение в подшипниках необходимо знать диаметр и длину цапфы (d_z и l_z).

Точное определение d_z и l_z , а следовательно и потери на трение возможны лишь после вычерчивания расположения отдельных частей машины и определения их веса (принимая также во внимание и вес ременного шкива) (см. гл. IX). Однако для предварительных подсчетов можно этого не делать и пользоваться следующими приближенными формулами.

Диаметр цапфы

$$d_z = (0,7 + 0,9) d_n \dots \dots \dots (205)$$

где d_n — диаметр вала в самой его толстой части, который можно определять по уравнению

$$d_n \approx 28 \sqrt[3]{\frac{P}{n_s}} \dots \dots \dots (206)$$

здесь

P — полезная мощность двигателя в kW,

n_s — число оборотов в минуту.

При установлении величины диаметра цапфы нужно стремиться к тому, чтобы окружная скорость на поверхности цапфы

$$v_z = \frac{\pi d_z n_s}{60} \dots \dots \dots (207)$$

не превосходила величины 450 — 550 см/сек.¹⁾

Наконец, длину цапфы можно принять равной

$$l_z = (1,5 + 4) \cdot d_z \dots \dots \dots (208)$$

при этом, чем меньше машина, тем больше будет отношение $l_z : d_z$ ²⁾.

Определив d_z , l_z и v_z , можно найти потерю на трение в подшипниках по формуле

$$(W_r)_z = m_z \cdot \frac{28}{T_z} \cdot d_z \cdot l_z \cdot v_z^{1,5} W \dots \dots \dots (209)$$

где m_z — число подшипников машины³⁾,

T_z — температура цапфы, которая по Lasche может для $v_z < 5$ м/сек. определяться по формуле

$$T_z = 12v_z + 20 \dots \dots \dots (210)$$

Для тех машин, у которых окружная скорость цапфы превышает 4 м/сек., определение потери $(W_r)_z$ может быть произведено по формуле Gumbel'я⁴⁾

$$(W_r)_z \approx m_z \cdot 2,3 \cdot l_z \sqrt{\lambda \cdot p_z \cdot d_z \left(1 + 4 \frac{d_z}{l_z}\right)} \cdot v_z^{1,5} W \dots \dots \dots (211)$$

¹⁾ Это не относится к быстроходным моторам большой мощности (турбомоторам), для которых v_z может иметь значительно большую величину.

²⁾ Для l_z и d_z следует брать нормализованные величины, указанные в гл. IX, 1.

³⁾ Часто все цапфы делаются одного диаметра, но если это условие не соблюдено, то потерю на трение нужно рассчитывать для каждой цапфы отдельно.

⁴⁾ Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, 1918, стр. 205.

В этой формуле λ — вязкость масла, которая по Lasche¹⁾ определяется из уравнения

$$\lambda = \left(\frac{50}{T_s} \right)^2 \cdot \lambda_{50} \text{ кг сек./м}^2,$$

где λ_{50} — вязкость при температуре в 50°C — для машинного масла колеблется в пределах $0,0015 \div 0,002 \text{ кг сек./м}^2$ (обычно $T_s \approx 50^\circ\text{C}$),

p_i — удельное давление на подшипник, которое, для весьма быстроходных машин (турбомоторы) обычно составляет

$$p_s = \frac{40 \div 60}{v_s} \leq 2 \div 2,5 \text{ кг/см}^2,$$

а для нормальных быстроходных машин — около $3 \div 3,5 \text{ кг/см}^2$.

В уравнениях (209), (210) и (211) скорость v_s должна быть выражена в метрах в секунду.

При шариковых и роликовых подшипниках потеря на трение составляет обычно лишь около 10% потери в подшипниках с кольцевой смазкой.

Эта потеря может определяться по формуле²⁾

$$(W_r)_s \approx 0,015 \cdot m_s \cdot \frac{S}{d_o} \cdot v_s \cdot W, \dots \dots \dots (212)$$

где S — нагрузка одного подшипника в кг ,

d_o — диаметр окружности, проходящей через центры шариков.

с) Трение о воздух.

Потеря на трение о воздух точному учету не поддается. Величина ее зависит от расположения обмотки, числа и величины воздушных каналов и других причин.

При окружных скоростях до 40 м/сек. эту потерю можно принимать

$$(W_r)_i = (0,1 \div 0,25) (W_r)_s \dots \dots \dots (213)$$

при больших же скоростях и при сильно вентилируемых машинах величина этой потери будет значительно больше и у турбомоторов может достигнуть даже $2 \div 3\%$ общей мощности машины.

В машинах, через которые воздух прогоняется с помощью вентилятора, эта потеря может быть подсчитана по формуле

$$(W_r)_i \approx 1,1 \cdot Q' \cdot v^2, \dots \dots \dots (213a)$$

где Q' — количество воздуха, продуваемое через машину в $\text{м}^3/\text{сек.}$, [см. уравнение (348) в гл. VII, 4],

v — окружная скорость ротора в м/сек.

Если вентилятор непосредственно соединен с мотором (сидит с ним на одном валу), то потеря увеличится на величину мощности, затрачиваемой на вращение вентилятора, и будет составлять

$$(W_r)_i \approx 1,1 \cdot Q' \cdot v^2 + P_i \dots \dots \dots (213b)$$

где P_i — мощность вентилятора, определяемая по уравнению (351) гл. VII, 4.

¹⁾ Lasche. — Konstruktion und Material im Bau von Turbodynamos, Berlin, 1920.

²⁾ См. Hütte, т. I.

5. Омические потери в обмотке статора и ротора.

При холостом ходе двигателя в обмотке его статора протекает ток холостого хода I_o , равный геометрической сумме безваттного тока I_{o1} (гл. III, 9) и ваттного тока, идущего на покрытие потерь холостого хода, который мы обозначим через I_{o2} .

$$I_o = \sqrt{I_{o1}^2 + I_{o2}^2} \dots \dots \dots (214)$$

Ток I_o будет вызывать омическую потерю в обмотке статора, равную

$$(W_R)_o = m_1 \cdot I_o^2 \cdot r_1 = 3 \cdot I_o^2 \cdot r_1 W \dots \dots \dots (215)$$

В роторе, строго говоря, тоже будет иметь место омическая потеря, но при холостом ходе ток ротора трехфазного двигателя настолько мал, что им можно пренебречь.

В однофазных двигателях роторным током, как это следует из теории этих двигателей¹⁾, даже при холостом ходе пренебречь нельзя. Для этого типа двигателей потеря в статоре будет составлять

$$I_o^2 \cdot r_1 W,$$

а потеря в роторе

$$I_o^2 \cdot 2r_2' W,$$

где $2r_2'$ — приведенное к статору сопротивление ротора.

Таким образом, полная омическая потеря холостого хода для однофазного двигателя будет

$$(W_R)_o = I_o^2 (r_1 + 2r_2') W \dots \dots \dots (216)$$

Так как полный ток холостого хода, входящий в формулы (215) и (216), нам еще неизвестен, то для определения омических потерь можно вместо I_o подставить чрезвычайно близкую ему величину I_{o1} .

Тогда:

для трехфазного тока

$$(W_R)_o = 3 I_{o1}^2 \cdot r_1 W \dots \dots \dots (217)$$

для однофазного тока

$$(W_R)_o = I_{o1}^2 (r_1 + 2r_2') W \dots \dots \dots (281)$$

6. Определение ваттной составляющей тока холостого хода.

Таким образом, сумма потерь при холостом ходе будет составлять

$$W_o = (W_h)_{os} + (W_h)_{ms} + (W_f)_{os} + (W_f)_{ms} + (W_o)_s + (W_o)_r + \\ + (W_p)_s + (W_p)_r + (W_e)_k + (W_r)_s + (W_r)_l + (W_R)_o W \dots \dots \dots (219)$$

Отсюда определяем ваттную составляющую тока холостого хода: для трехфазного двигателя

$$I_{o2} = \frac{W_o}{3 \cdot E_1} \dots \dots \dots (220)$$

для однофазного двигателя

$$I_{o2} = \frac{W_o}{E_1} \dots \dots \dots (221)$$

¹⁾ См. Arnold.—Wechselstromtechnik, т. V, 1.

7. Сила тока холостого хода и $\cos \varphi_o$. Максимальная мощность. Коэффициент перегрузки.

Полная сила холостого хода определяется из выражения

$$I_o = \sqrt{I_{o1}^2 + I_{o2}^2} \dots \dots \dots (222)$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_o = \frac{I_{o2}}{I_o} \dots \dots \dots (223)$$

Мы можем теперь определить также максимальную мощность мотора и коэффициент перегрузки, т.е. отношение максимальной мощности к нормальной.

Как известно из теории асинхронных двигателей ¹⁾
для трехфазного двигателя

$$P_{\max} = 3 \cdot E_1 \frac{I_k - I_o}{2(1 + \cos \varphi_k)} \dots \dots \dots (224)$$

для однофазного двигателя

$$P_{\max} = E_1 \frac{I_k - I_o}{2(1 + \cos \varphi_k)} \dots \dots \dots (225)$$

Коэффициент перегрузки

$$k_p = \frac{P_{\max}}{P} \dots \dots \dots (226)$$

Для трехфазных двигателей обычно $k_p = 1,6 - 3$.

Для однофазных двигателей k_p значительно меньше и обычно равен 1,3—1,8.

По „Нормам союза германских электротехников“, коэффициент перегрузки для трехфазных двигателей должен лежать в пределах следующих значений:

а) Двигатели с короткозамкнутым ротором.

Мощность kW	Число оборотов n_s	Коефф. перегр. k_p
До 15 {	3 000 ÷ 1 000	2 ÷ 2,5
	750 ÷ 500	1,6 ÷ 2
От 20 до 100	3 000 ÷ 500	2 ÷ 2,5

б) Двигатели с кольцами.

Мощность kW	Число оборотов n_s	Коефф. перегр. k_p
До 15 {	3 000 ÷ 1 000	2 ÷ 2,5
	750 ÷ 500	1,6 ÷ 2
От 20 до 250	3 000 ÷ 500	2 ÷ 2,5

¹⁾ Arnold. — Wechselstromtechnik, т. V, 1, стр. 109 и 164.

По ОСТ 678 и ОСТ 679 коэффициенты перегрузки для трехфазных двигателей должны иметь следующие значения.

а) Двигатели с короткозамкнутым ротором.

Мощность kW	Число оборотов n_s	Коэфф. перегр. k_p
0,1 ÷ 100 {	3 000 ÷ 1 500	не менее 2
	1 000 ÷ 600	не менее 1,8

б) Двигатели с кольцами.

Мощность kW	Число оборотов n_s	Коэфф. перегр. k_p
1,75 ÷ 300 {	3 000 ÷ 1 500	не менее 2
	1 000 ÷ 600	не менее*1,8

ГЛАВА VI.

Круговые диаграммы и рабочие кривые.

1. Диаграмма магнитных полей и токов многофазных асинхронных двигателей.

Весьма удобным средством для исследования асинхронных двигателей являются круговые диаграммы, позволяющие легко получить с достаточной для практических целей точностью все данные, характеризующие проектируемый мотор при всех режимах его работы. В дальнейших параграфах мы подробно рассмотрим различные типы диаграмм, отличающиеся друг от друга большей или меньшей сложностью построений и точностью получаемых результатов. Однако, исходным пунктом для всех диаграмм служит основная упрощенная диаграмма магнитных полей и токов, к описанию которой, сначала для многофазных (в частности трехфазных) двигателей, мы и переходим.

Нашу диаграмму мы будем строить, исходя из допущения, что в двигателе никаких потерь, кроме как в меди ротора, не существует, т.е. что сопротивление статора равно нулю и потери в железе и на трение отсутствуют.

В главе IV мы нашли, что статор и ротор обладают индуктивными сопротивлениями x_1 и x_2 , обусловленными рассеянием магнитных потоков.

Если мы предположим, что сила тока в обмотке ротора равна нулю, то можно себе представить, что ампервитки статора образуют два потока: один Φ_1' , который одновременно охватывает витки и статора и ротора (поток статора в воздушном промежутке), и другой Φ_{s1} , который охватывает только витки статора, замыкаясь помимо витков ротора (поток рассеяния статора). Отношение этих двух потоков называется коэффициентом рассеяния статора

$$\frac{\Phi_{s1}}{\Phi_1'} = \sigma_1 \quad (227)$$

Повторяя те же рассуждения для ротора (т.е. предполагая, что $I_1 = 0$), мы получим аналогично

$$\frac{\Phi_{s2}}{\Phi_1''} = \tau_2, \dots \dots \dots (228)$$

где: Φ_{s2} — поток рассеяния ротора, т.е. поток, охватывающий только витки ротора,
 Φ_1'' — поток ротора в воздушном промежутке, охватывающий витки и ротора и статора,
 τ_2 — коэффициент рассеяния ротора.

Поток рассеяния статора Φ_{s1} наводит в статоре ЭДС рассеяния, определяемую выражением

$$E_{s1} = I_1 \cdot x_1, \dots \dots \dots (229)$$

а поток Φ_1' наводит в роторе ЭДС E_2' , которая, будучи приведена к числу витков и периодов статора, определяется выражением

$$(E_2') = 2,22 \cdot f \cdot f_{12} \cdot z_1 \cdot \Phi_1' \cdot 10^{-8} \dots \dots \dots (230)$$

Тогда

$$\tau_1 = \frac{\Phi_{s1}}{\Phi_1'} = \frac{E_{s1}}{(E_2')} \dots \dots \dots (231)$$

Аналогично для ротора

$$\tau_2 = \frac{\Phi_{s2}}{\Phi_1''} = \frac{E_{s2}}{(E_1'')} \dots \dots \dots (232)$$

где

$$E_{s2} = I_2 \cdot x_2 \dots \dots \dots (233)$$

ЭДС рассеяния ротора, наводимая потоком Φ_{s2} ,

$$(E_1'') = 2,22 \cdot sf \cdot f_{21} \cdot z_2 \cdot \Phi_1'' \cdot 10^{-8} \dots \dots \dots (234)$$

ЭДС, наводимая в статоре потоком Φ_1'' и приведенная к числу периодов и витков ротора.

Если мы условимся определять ЭДС статора при холостом ходе, т.е. при томе статора $I_1 = I_{01}$ ¹⁾, а ЭДС ротора — при возбуждающем такой же поток тока

$$I_2 = I_{01} \frac{m_1 f_1 z_1}{m_2 f_2 z_2}$$

и частоте статора f , то

$$\Phi_1' = \Phi_1'' = \Phi$$

и

$$\tau_1 = \frac{I_{01} \cdot x_1}{2,22 \cdot f \cdot f_{12} \cdot z_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8}} \dots \dots \dots (235)$$

$$\tau_2 = \frac{I_{01} \frac{m_1 f_1 z_1}{m_2 f_2 z_2} \cdot x_2}{2,22 \cdot f \cdot f_{21} \cdot z_2 \cdot \Phi \cdot 10^{-8}} \dots \dots \dots (236)$$

Диаграмма магнитных полей многофазного асинхронного мотора при нагрузке представлена на фиг. 75. Если внешнее напряжение поддерживается постоянным, то и результирующий магнитный поток, проходящий через витки статора и равный геометрической сумме потока рассеяния статора, потока, посылаемого статором

¹⁾ Потери мы, как сказано выше, пренебрегаем.

через воздушный промежуток в ротор, и потока, посылаемого ротором через воздушный промежуток в статор ¹⁾, т.е. поток

$$\Phi_1 = \Phi_{s1} + \Phi_i' + \Phi_i'' \dots \dots \dots (237)$$

должен быть постоянным ²⁾. Этот поток создается намагничивающими ампервитками (также постоянными по величине) и находится с ними в фазе. Поток Φ_1 на фиг. 75 обозначен отрезком ad , при чем часть его ab сцеплена только с витками статора, и поэтому

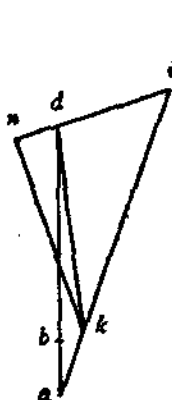
$$ab = \tau_1 \cdot bd \dots \dots \dots (238)$$

Составляющие потока Φ_1 обозначены на фиг. 75:

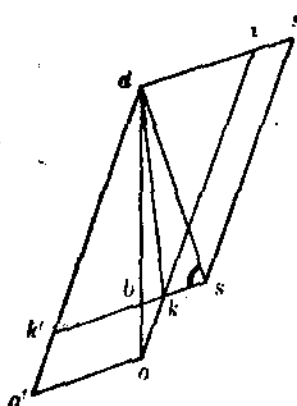
поток Φ_{s1} — отрезком ak ,

поток Φ_i' — отрезком kl ,

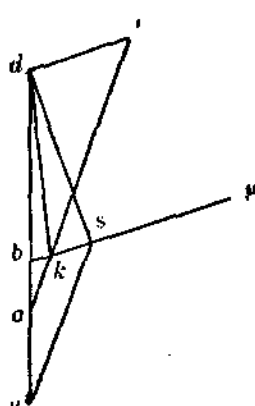
поток Φ_i'' — отрезком id .



Фиг. 75.



Фиг. 76.



Фиг. 77.

Так как поток Φ_1 создается намагничивающими ампервитками, равными геометрической сумме статорных и роторных ампервитков, то естественно предположить, что составляющие потоки создаются:

$\Phi_{s1} + \Phi_i'$ — полными ампервитками статора и

Φ_i'' — ампервитками ротора

и находятся с ними в фазе.

Результирующий поток, проходящий через витки ротора, будет аналогично равен геометрической сумме потока рассеяния ротора, потока, посылаемого ротором через воздушный промежуток в статор, и потока, посылаемого статором через воздушный промежуток в ротор, т.е.

$$\Phi_{II} = \Phi_{s2} + \Phi_i'' + \Phi_i' \dots \dots \dots (239)$$

На фиг. 75 поток Φ_{s2} обозначен отрезком nd , а поток Φ_{II} — отрезком kn . При этом поток $\Phi_{s2} + \Phi_i''$ создается полными ампервитками ротора, а Φ_i' — ампервитками статора.

Потоки Φ_i' и Φ_i'' в действительности не существуют и введены нами как вспомогательные величины, так как в действительности МДС статора и ротора действуют не отдельно, а в виде некоторой результирующей МДС, которая и создает

¹⁾ При этом мы пока предполагаем, что МДС статора и ротора действуют отдельно и независимо друг от друга.

²⁾ Двойным знаком (+) мы будем отличать геометрическое сложение от арифметического.

вращающийся поток в воздушном промежутке двигателя ¹⁾. Этот вращающийся поток, являющийся результатом совместного действия МДС статора и ротора будет равен геометрической сумме

$$\Phi_i = \Phi_i' + \Phi_i'' \dots \dots \dots (240)$$

и на фиг. 75 изобразится отрезком

$$dk = ki + id.$$

Обычно встречающаяся в технической литературе диаграмма магнитных полей имеет вид, представленный на фиг. 76, которая получается из фиг. 75, если поток рассеяния ротора отложить не влево от id , а вправо. Откладывая $is' = \Phi_{s2}$ и проводя прямую $skbk'$ параллельно dis' и параллельные между собой прямые ss' , $a'd$ и ai , получаем фиг. 76.

Здесь

$$kd = \Phi_i,$$

$$sd = \Phi_{II} = \Phi_2 + \Phi_i',$$

где

$$\Phi_2 = \Phi_{s2} + \Phi_i'',$$

$$ad = \Phi_I = \Phi_1 + \Phi_i''$$

где

$$\Phi_1 = \Phi_{s1} + \Phi_i'.$$

Посмотрим теперь, каким образом можно применить нашу диаграмму для любой нагрузки двигателя. Для этого прежде всего несколько изменим фиг. 75 и 76, как показано на фиг. 77, а именно: обе прямые abd и aki оставим, как и прежде, а к прямой ndi (фиг. 75) проведем параллельную прямую, проходящую через точки b и k . Что bk параллельна nd , следует из соотношений

$$ab = \tau_1 bd \quad \text{и} \quad ak = \tau_1 ki,$$

откуда

$$\frac{ab}{ak} = \frac{bd}{ki}.$$

На продолжении bk откладываем от k поток рассеяния ротора

$$\Phi_{s2} = ks$$

и от s поток

$$\Phi_i'' = sp.$$

Так как

$$dk = \Phi_i,$$

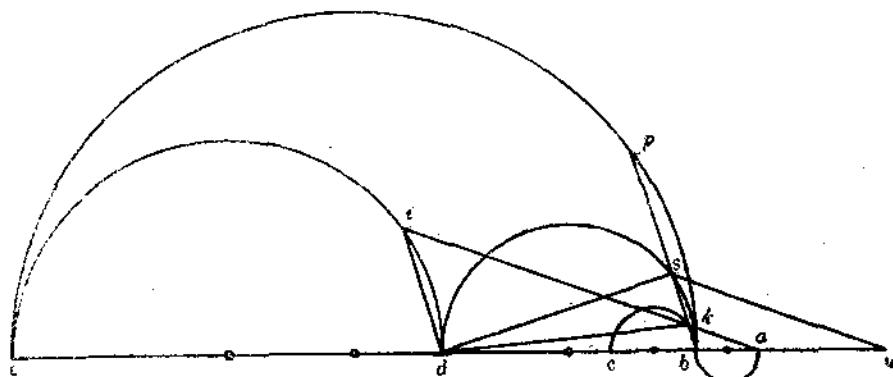
то (фиг. 75)

$$\Phi_i + \Phi_{s2} = \Phi_{II} = ds \text{ (фиг. 77),}$$

при чем Φ_{II} перпендикулярно к направлению роторного тока. Поэтому угол $bsd = 90^\circ$, и при всех изменениях нагрузки точка s будет лежать на окружности, описанной на bd , как на диаметре. Так как поля Φ_i , Φ_1 и Φ_2 вызываются ампервитками, соответствующими токам I_μ , I_1 и I_2 , и находятся с ними в фазе, то треугольник abk (фиг. 77) определяет в некотором масштабе по величине и направлению токи I_μ , I_1 и I_2 , т.е. будет треугольником токов. Можно построить еще треугольник bsu (проведя su параллельно ai), который, будучи подобен треугольнику abk , также

¹⁾ В асинхронных двигателях, как и в трансформаторах, как известно из теории, намагничивающий ток равен геометрической сумме первичного и приведенного вторичного токов (в данном случае статорного и роторного) и при всех нагрузках имеет одну и ту же величину.

может служить для определения величин и направлений токов. Наконец, и треугольник adi , подобный первым двум, также является треугольником токов. Отсюда ясно, что точки k, i, p при изменении нагрузки также движутся по окружностям, как и s . При увеличении нагрузки наступит такое положение (фиг. 78), когда k совпадет с c , s с d , i и p с e . Это положение называется состоянием короткого замыкания. При любой нагрузке ток статора I_1 может быть выражен отрезком us , ток ротора I_2 — отрезком bs , намагничивающий ток I_μ ($= \text{const}$) — отрезком ub . Из фиг. 78 видно, что полная диаграмма полей состоит из трех диаграмм токов



Фиг. 78.

(треугольники abk , ubs и adi). Для практического применения оставляют лишь $\triangle ubs$ и тогда диаграмма получит вид, показанный на фиг. 79. Чтобы получить ампервитки ротора в том же масштабе, как и ампервитки статора, к отрезку bs (фиг. 79) необходимо еще прибавить отрезок vb , при чем

$$vb = \tau_1 \cdot bs.$$

Эту прибавку можно учесть графически, если на ab , как на диаметре, построить полуокружность и приравнивать ампервитки ротора отрезку vs . Из построения диаграммы ясно, что uv параллельно kd , представляющему поле Φ_1 . Кроме того

$$\frac{ub}{bd} = \frac{uv}{kd}.$$

Поэтому uv представляет собой ток (или вернее ампервитки), необходимый для создания потока Φ_1 .

Возвращаясь к диаграмме, представленной на фиг. 78, мы видим, что при коротком замыкании ток I_1 достигнет величины ud и он один, без участия роторного тока I_2 , будет возбуждать полное статорное поле $\Phi_1 = ae$, при чем части его $\Phi_{s1} = ac$ и $\Phi_i' = ce$ и в этом случае должны удовлетворять зависимости

$$ac = \tau_1 \cdot ce \quad (241)$$

Поле ротора, которое при произвольной нагрузке представлено отрезком kp

$$kp = \Phi_2 = \Phi_{s2} + \Phi_i'' = ks + sp,$$

при коротком замыкании достигнет величины ce , при чем

$$cd = \tau_2 \cdot de \quad (242)$$

Прибавляя к обеим частям этого равенства по de , получим

$$ce = (1 + \tau_2) de \quad (243)$$

Прибавляя к обеим частям уравнения (241) по ce , получим

$$ae = (1 + \tau_1) ce \quad (244)$$

Подставляя уравнение (243) в (244), найдем, что

$$ae = (1 + \tau_1) (1 + \tau_2) de \quad (245)$$

Так как

$$(1 + \tau_1) (1 + \tau_2) = 1 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 = 1 + \tau \quad (246)$$

где

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2,$$

то

$$ae = (1 + \tau) de \quad (247)$$

или вычитая из обеих частей уравнения (247) по de

$$ad = \tau \cdot de, \quad (248)$$

где величина τ называется коэффициентом рассеяния двигателя.

Так как

$$\frac{ad}{de} = \frac{ub}{bd} = \tau,$$

то

$$ub = \tau \cdot bd \quad (249)$$

Точно так же

$$ab = \tau \cdot bc \quad (250)$$

Определение величины τ через ток короткого замыкания и намагничивающий ток будет дано в следующем параграфе.

Описанная нами диаграмма легла в основу более детально разработанных диаграмм, позволяющих с большей или меньшей точностью определить не только силы токов, но и другие величины, характеризующие работу двигателя при различных нагрузках.

2. Диаграмма Heyland'a для трехфазных двигателей.

Диаграмма Heyland'a изображена на фиг. 80. Отрезок ubd представляет собой основание диаграммы, на части которого bd , как на диаметре, описана полуокружность. Масштаб, в котором чертится диаграмма, совершенно произволен, однако, отношение отрезка ub к диаметру круга bd есть величина вполне определенная и равная коэффициенту рассеяния двигателя τ

$$ub = \tau \cdot bd, \quad (251)$$

кроме того

$$ab = \tau_1 \cdot bd \quad (252)$$

$$ua = \tau_2 \cdot ad, \quad (253)$$

где τ_1 — коэффициент рассеяния статора,

τ_2 — " " ротора.

Отрезок bd при отсутствии тока в роторе представляет по величине и направлению магнитный поток одного полюса в воздушном промежутке, при чем совершенно безразлично, будем ли мы рассматривать ротор вращающимся с синхронной

Проведя прямую br и называя угол vbr через β , получим

$$\frac{tr}{tb} = \operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \operatorname{const}.$$

Так как

$$\frac{tr}{tb} = \operatorname{const},$$

то и

$$\frac{vr}{tb} = \operatorname{const},$$

Подобно тому как и раньше,

$$bt = \frac{bs^2}{bd}.$$

Так как сила тока в роторе

$$I_2 = C_{12} (1 + \tau_1) \cdot bs,$$

то

$$bt = \frac{1}{bd} \cdot \left[\frac{I_2}{(1 + \tau_1) \cdot C_{12}} \right]^2.$$

Далее

$$vr = \frac{m_2 \cdot r_2 \cdot I_2^2}{C_p} = \text{потере мощности в роторе},$$

поэтому

$$\frac{vr}{bt} = m_2 \cdot r_2 \frac{[(1 + \tau_1) C_{12}]^2}{C_p} \cdot bd,$$

$$\operatorname{tg}(\alpha + \beta) = \frac{tv + vr}{bt} = \frac{bd}{C_p} \left\{ m_1 \cdot r_1 \cdot C_{11}^2 + m_2 \cdot r_2 [(1 + \tau_1) C_{12}]^2 \right\}.$$

Таким образом отрезки ts , vs и rs представляют собой:

ts — подводимую к статору мощность P_s ,

vs — передаваемую вращающемуся потоку мощность P_Φ ,

rs — полезную мощность двигателя P

в предположении, что никаких потерь, кроме омических, в обмотках двигателя нет.

Что касается числа оборотов в минуту, то оно, как известно, равно

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} (1 - s), \dots \dots \dots (260)$$

где s — скольжение ротора.

Величина же скольжения, как известно из теории асинхронных двигателей, определяется отношением потерь в меди ротора к мощности вращающегося потока, т.-е. отношением

$$\frac{vr}{vs} = s \dots \dots \dots (261)$$

Прямая br пересекает диаграммный круг в точке s' , которая соответствует короткому замыканию двигателя ¹⁾. Из этой точки s' проводим прямые $s'p$ и $s'd$ так, чтобы они образовали с перпендикуляром, опущенным из s' на основание диаграммы, углы α и $(\alpha + \beta)$. Кроме того, точку d соединяем с точкой s , соответствующей данному току I_1 .

Вследствие подобия треугольников $\triangle bvr$ и $\triangle s'pd$ можно написать, что

$$\frac{vr}{vb} = \frac{pd}{ps'} \quad \text{или} \quad vr = vb \cdot \frac{pd}{ps'}.$$

¹⁾ Ибо, как видно из диаграммы, при статорном токе is' вся подводимая к мотору мощность расходуется лишь на омические потери в статоре и роторе.

Подставляя это выражение в уравнение (261), получим

$$s = \frac{vb}{vs} \cdot \frac{pd}{ps'} \dots \dots \dots (262)$$

Кроме того, из подобия треугольников $\triangle bvs$ и $\triangle p'pd$ имеем

$$\frac{vb}{vs} = \frac{pp'}{pd}.$$

Подставляя в уравнение (262), получим

$$s = \frac{pp'}{ps'}.$$

Разделив прямую ps' на 100 равных частей, получаем скольжение pp' прямо в процентах. Так как скольжение составляет даже при полной нагрузке лишь несколько процентов, то даже небольшая ошибка в измерении отрезка pp' может привести к неточным результатам. Во избежание этого желательно увеличить масштаб s , что достигается следующим образом. Из точки u проводим прямую us'' , параллельную ps' , и на прямой us'' наносим масштаб скольжения, увеличенный в $\frac{du}{dp}$ раз. Тогда продолжение прямой ds укажет на прямой us'' скольжение s в процентах.

Если бы мы захотели из только-что построенной диаграммы определить коэффициент полезного действия, как отношение

$$\eta = \frac{\text{полезная мощность}}{\text{подводимая мощность}} = \frac{rs}{ts},$$

то мы получили бы весьма неточные результаты, так как не приняли во внимание ни потерь в железе, ни потерь на трение. Покажем, каким образом можно учесть эти потери на диаграмме Heyland'a и тем добиться большей точности при определении η .

Потери в железе статора приблизительно постоянны, т.-е. при всех нагрузках приблизительно равны потерям в железе при холостом ходе ¹⁾, обусловленным ваттной составляющей тока холостого хода. Эта же ваттная составляющая обуславливает и омические потери в обмотке статора. Все эти потери можно учесть, если от точки u отложить перпендикулярно к основанию диаграммы отрезок

$$uu' = \frac{I_{02}}{C_{\pi}}, \dots \dots \dots (263)$$

где I_{02} — ваттная составляющая тока холостого хода (гл. V).

Точку u' (фиг. 81) соединяем с точкой b и через точку u' проводим линию $u'u''$, параллельную основанию диаграммы. Тогда ток холостого хода выразится отрезком $u'b$, а ток статора при какой-либо нагрузке — отрезком $u's$. Ток ротора не изменится. Подводимая к статору мощность выразится отрезком $t's$, мощность вращающегося поля — vs , полезная мощность — rs .

Коэффициент полезного действия выразится теперь отношением

$$\eta = \frac{sr}{st'} \dots \dots \dots (264)$$

и графически может быть найден следующим образом. Продолжим линию $s'b$ до пересечения в точке W с линией $u'u''$ и в точке W восстановим перпендикуляр WW' к $u'u''$. Из любой точки на линии Ws' или на ее продолжении

¹⁾ В диаграмме Heyland'a эти потери должны даже считаться строго постоянными, ибо здесь предположено постоянство ЭДС статора.

От точки u' откладываем вверх ваттную составляющую

$$I_{02} = C_{11} \cdot uu'$$

и через точку u проводим горизонталь ud . Соединяем точки b и s' прямой и в середине ее m восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с ud в точке O . Точка O и будет центром круга Heyland'a, описываемого радиусом Ob .

Положение линии bl можно было бы определить, построив угол α , величина которого в уравнении (258)

$$\operatorname{tg} \alpha = m_1 \cdot r_1 \frac{C_{11}^2}{C_p} \cdot bd.$$

Однако, проще определить точку n на перпендикуляре из s' из соотношения

$$\frac{nq}{s'q} = \frac{r_1}{r_k}.$$

Справедливость этого равенства легко доказывается, если разделить уравнение (258) на (259)

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} = \frac{nq}{qb} : \frac{s'q}{qb} = \frac{nq}{s'q} = \frac{m_1 \cdot r_1 \frac{C_{11}^2}{C_p} \cdot bd}{\frac{bd}{C_p} \left\{ m_1 r_1 C_{11}^2 + m_2 r_2 \left[(1 + \tau_1) C_{12} \right]^2 \right\}}.$$

Так как величина $(1 + \tau_1)^2$ чрезвычайно близка к 1 и

$$r_2 \cdot C_{12}^2 = \left(\frac{m_1 \cdot w_1 \cdot f_1}{m_2 \cdot w_2 \cdot f_2} \right)^2 \cdot C_{11}^2 \cdot r_2 = C_{11}^2 \cdot r_2',$$

то после подстановки и сокращения мы получим, что

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} = \frac{nq}{s'q} = \frac{r_1}{r_1 + r_2'} = \frac{r_1}{r_k}.$$

Дальнейшие построения производятся как указано выше.

Из диаграммы можно найти следующие величины:
статорный ток

$$I_1 = C_{11} \cdot u's \quad A,$$

роторный ток

$$I_2 = C_{12} \cdot (1 + \tau_1) bs \quad A,$$

потребляемую из сети мощность

$$P_s = C_p \cdot t's \quad W = \frac{C_p}{1000} \cdot t's \text{ kW},$$

мощность вращающегося поля

$$P_\Phi = C_p \cdot vs \quad W = \frac{C_p}{1000} \cdot vs \text{ kW},$$

вращающий момент

$$M = \frac{102}{1000} \cdot \frac{60}{2\pi n} \cdot C_p \cdot vs = \frac{0,975}{n} \cdot C_p \cdot vs \text{ mkg},$$

полезную мощность

$$P = C_p \cdot rs \quad W = \frac{C_p}{1000} \cdot rs \text{ kW},$$

потерю в статоре

$$(W)_s = C_p \cdot t'v \text{ W},$$

потерю в меди ротора

$$(W_k)_r = C_p \cdot vr \text{ W},$$

скольжение

$$s = pp' = us'' \%,$$

коэффициент полезного действия

$$\eta = MM',$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi = h'u'.$$

Исследуем еще вопрос о том, при каких условиях важнейшие, определяемые из диаграммы величины достигают своих максимальных и минимальных значений.

Статорный ток имеет минимальную величину при холостом ходе, когда

$$u's = u'b \quad \dots \dots \dots (267)$$

Своего максимального значения он достигает при коротком замыкании, когда

$$u's = u's' \quad \dots \dots \dots (268)$$

Если бы обмотки статора и ротора не обладали омическим сопротивлением, то в этом случае идеальный ток короткого замыкания был бы равен

$$u's = u'd,$$

или, так как uu' весьма мало по сравнению с $u'd$, то в этом случае

$$u's = ud \quad \dots \dots \dots (269)$$

Так как

$$ub = \tau \cdot bd \text{ [см. ур-ние (251)]}$$

и

$$ud = ub + bd = (1 + \tau) bd,$$

то отношение

$$\frac{ud}{ub} = \frac{I_{k1}}{I_{s1}} = \frac{1 + \tau}{\tau}, \quad \dots \dots \dots (270)$$

откуда

$$\tau = \frac{I_{o1}}{I_{k1} - I_{o1}} \quad \dots \dots \dots (271)$$

Из уравнения (270) видно, что чем меньше рассеяние, тем больше отношение тока короткого замыкания (при пуске под полным напряжением) к току холостого хода, т.-е. чем лучше мотор, тем хуже для него соотношения при пуске в ход.

Подводимая мощность будет наименьшей при холостом ходе (так как при этом $I_{\lambda} = \text{минимум} = I_0$). Максимального значения она достигает при токе

$$I_1 = C_{11} \cdot u's''',$$

при чем точка s''' определяется восстановлением перпендикуляра к основанию диаграммы в центре круга до пересечения с окружностью.

$$(P_s)_{\min} = C_p \cdot t''b \quad \dots \dots \dots (272)$$

$$(P_s)_{\max} = C_p \cdot t'''s''' \quad \dots \dots \dots (273)$$

Мощность вращающегося поля имеет минимум при холостом ходе и максимум при силе тока

$$I_1 = C_{11} \cdot u's^{IV},$$

определяемой опусканием перпендикуляра из O на bt и продолжением его до пересечения с окружностью в точке s^{IV}

$$(P_{\phi})_{\min} = 0 \quad \dots \dots \dots (274)$$

$$(P_{\phi})_{\max} = C_p \cdot v^{IV}s^{IV} \quad \dots \dots \dots (275)$$

Полезная мощность имеет минимум при холостом ходе и коротком замыкании и максимум при силе тока

$$I_1 = C_{11} \cdot u' s^V,$$

определяемой опусканием перпендикуляра из O на bs' и продолжением его до пересечения с окружностью в точке s^V .

$$(P)_{\min} = 0 \quad \dots \dots \dots (276)$$

$$(P)_{\max} = C_p \cdot r^V s^V \quad \dots \dots \dots (277)$$

Скольжение имеет минимум при холостом ходе и максимум при коротком замыкании

$$(s)_{\min} = 0 \quad \dots \dots \dots (278)$$

$$(s)_{\max} = 1 \quad \dots \dots \dots (279)$$

Коэффициент мощности имеет минимум в хороших конструкциях, при холостом ходе ¹⁾, и максимум, когда вектор статорного тока касается окружности (точка s^{VI}). Как известно из теории, для трехфазных двигателей

$$(\cos \varphi)_{\max} = \frac{1}{1 + 2\tau} \quad \dots \dots \dots (280)$$

Наконец, коэффициент полезного действия имеет минимум при холостом ходе и коротком замыкании и максимум в зависимости от конструкции и мощности (обычно $\eta_{\max}$ имеет место при нормальной нагрузке)

$$(\eta)_{\min} = 0 \quad \dots \dots \dots (281)$$

Как мы уже неоднократно указывали, диаграмма Heyland'a дает результаты, приближающиеся к действительности лишь для двигателей средней и большей мощности, когда потери в меди статора относительно всей мощности двигателя невелики. Для малых же моторов и при желании строго исследовать работу машины следует безусловно предпочесть диаграмму Ossanna-Sumec'a.

3. Диаграмма Ossanna-Sumec'a для трехфазных двигателей.

На фиг. 82 ubd представляет собой основание диаграммы Heyland'a, при чем

$$ub = \tau \cdot bd.$$

Эта диаграмма была бы правильной, если бы сопротивление статора

$$r_1 = 0.$$

При этом допущении ЭДС самоиндукции в обмотке статора E_1' при всех нагрузках будет иметь постоянную величину, равную напряжению на зажимах.

При описании диаграммы Heyland'a мы указывали, что напряжение на зажимах E_1 будет направлено по линии um , теперь же мы посмотрим, в каком масштабе оно измеряется. Намагничивающий ток

$$I_\mu = I_{01} = ub$$

обуславливает в обмотке статора потерю напряжения

$$I_{01} \cdot r_1,$$

¹⁾ При очень большом рассеянии, минимум коэффициента мощности может иметь место при коротком замыкании.

ности. При отыскании этой окружности мы будем исходить из предположения, что постоянным является напряжение $E_1(um)$, а не ЭДС $E'_1(sm = um')$. При этом мы получим диаграмму фиг. 82. Здесь um — постоянное напряжение, одна составляющая которого us , направленная по току статора, идет на покрытие омической потери в обмотке статора, а другая составляющая $sm = um'$ уравнивает противо-ЭДС статора. Основание диаграммы $ub'd'^1)$ при любой нагрузке пропорционально составляющей sm и $sm = um'$ всегда перпендикулярно к ud' . Диаграмма $ub'sd'$ соответствует тогда двигателю, у которого $r_1 = 0$ и к которому приложено напряжение $sm = um'$. Угол сдвига фаз при этом будет φ' . При учете же потери напряжения us напряжение равно um и угол сдвига — φ . Легко показать аналитически ²⁾, что геометрическим местом точек s будет круг, радиус которого

$$R = \sqrt{a^2 + b^2 - \frac{ub^2}{B}}, \quad \dots \dots \dots (287)$$

где a и b — координаты центра круга M_o (фиг. 82), определяемые уравнениями

$$a = \frac{K}{B} \cdot ub \quad \dots \dots \dots (288)$$

$$b = \frac{1 + \tau}{2 \cdot B(1 + \tau)} \cdot ub \quad \dots \dots \dots (289)$$

$$K = \frac{J_{01} \cdot r_1}{E_{1x}} = \frac{ub'}{sm} = \text{const} \quad \dots \dots \dots (290)$$

$$B = \frac{\tau}{1 + \tau} + K^2 \quad \dots \dots \dots (291)$$

Подставляя уравнения (288 — 291) в (287) и принимая во внимание, что

$$ub = \tau \cdot bd,$$

найдем

$$R = \frac{bd}{2} \cdot \frac{\tau}{1 + \tau} \cdot \frac{1}{B} \quad \dots \dots \dots (292)$$

Тогда отношение

$$\frac{\text{диаметр круга Heyland'a}}{\text{диаметр круга Ossanna}} = \frac{bd}{2R} = B \frac{1 + \tau}{\tau} \quad \dots \dots \dots (293)$$

Таким образом, диаметр круга Ossanna и координаты его центра легко могут быть найдены по уравнениям (288 — 292). Нанеся (фиг. 82) координаты a и b и описав круг радиусом R , мы получаем диаграмму Ossanna.

Покажем теперь, каким образом на диаграмме Ossanna можно учесть потери в железе, равные, согласно гл. V,

$$W_s = (W_h)_{os} + (W_h)_{ss} + (W_l)_{os} + (W_l)_{ss} + (W_o)_s + (W_o)_r + (W_p)_s + (W_p)_r \quad \dots (294)$$

На диаграмме Heyland'a мы учитывали эти потери тем, что от точки u (фиг. 83) откладывали отрезок ui такой величины, чтобы ³⁾

$$ui = \frac{W_s}{C_p} \quad \dots \dots \dots (295)$$

¹⁾ За основание взято $ub'd'$, а не ubd , так как мы знаем, что ЭДС перпендикулярна к основанию.

²⁾ См. статью Куниманн'a в ETZ, 1901 г.

³⁾ Практически на диаграмме Heyland'a откладывают полную потерю холостого хода W_o , соответствующую току I_{00} , так как при неточности диаграммы Heyland'a влиянием потерь на трение и омических можно пренебречь.

При этом, как следует из самого метода Heyland'a, мы предполагали, что

$$r_1 = 0$$

и величина намагничивающего тока

$$I_p = C_{11} \cdot ub.$$

Если принимать во внимание сопротивление ротора, т.е. перейти к диаграмме Ossappa, то из фиг. 83 видно, что намагничивающий ток будет не ub , а uB_o . Соединяем i с B_o и проводим линию uB_o , параллельную iB_o . Тогда отрезок uB_o и даст нам величину тока холостого хода (если пренебречь потерями на трение)

$$I_o = C_{11} \cdot uB_o;$$

его ваттная составляющая $B_o B_o$ направлена одинаково с напряжением mb , а безваттная составляющая uB_o ей перпендикулярна.

Таким образом в диаграмме Heyland'a действующая в статоре ЭДС $= im$ — полному напряжению E_1 ; в диаграмме Ossappa в статоре действует ЭДС $B_o m$, а составляющая uB_o идет на покрытие потери напряжения в статоре. Если же ввести потери в железе, то в статоре будет действовать ЭДС mB_o , и потеря напряжения достигнет величины uB_o .

При ЭДС $= im$ для покрытия потерь в железе необходим был ваттный ток iu . Если же ЭДС упадет до величины $B_o m$, то в том же отношении должен уменьшиться ваттный ток $B_o B_o$, т.е.

$$\frac{B_o B_o}{iu} = \frac{B_o m}{im}.$$

Проекция ul' тока холостого хода uB_o на напряжение im дает полную потерю ¹⁾

$$W_o - W_r = C_p \cdot ul' = m_1 \cdot r_1 \cdot I_o^2 + W_o \dots \dots \dots (296)$$

Таким образом, мы видим, что при холостом ходе точка B_o вследствие потерь в железе придвигается по линии $bB_o m$ ближе к m (до точки B_o), при чем

$$\frac{B_o m}{B_o m} = \frac{im}{im}.$$

При нагрузке и при отсутствии потерь в железе статорный ток имеет величину is , при чем точка s лежит на круге Ossappa, описанном из центра M_o . Действующая при этом в статоре ЭДС равна sm . При наличии же потерь в железе статорный ток должен увеличиться на ваттную составляющую ss_o , где

$$\frac{ss_o}{s_o m} = \frac{iu}{im}.$$

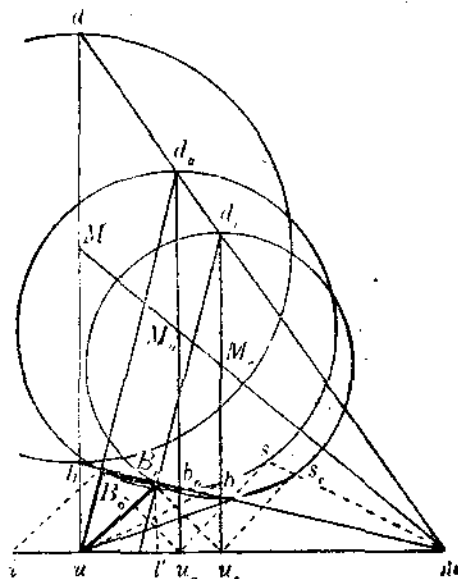
Тогда получаем пропорцию

$$\frac{s_o m}{sm} = \frac{im}{im},$$

из которой следует, что и при учете потерь в железе конец вектора силы тока в статоре (s_o) передвигается по окружности. Это положение было доказано

¹⁾ В этой формуле W_r — потеря на трение, равная (гл. V) сумме

$$(W_r)_k + (W_r)_s + (W_r)_r.$$



Фиг. 83.

Сумес'ом, и поэтому окружность, по которой передвигается точка s , мы будем называть кругом Сумес'а. Этот круг, как это следует из нашего рассмотрения, подобен кругу Оссанна. Легко показать ¹⁾, что диаметр этого круга

$$2R_s = \frac{2 \cdot ub}{1+H} \cdot \frac{1}{2B(1+\tau)}, \quad (297)$$

где

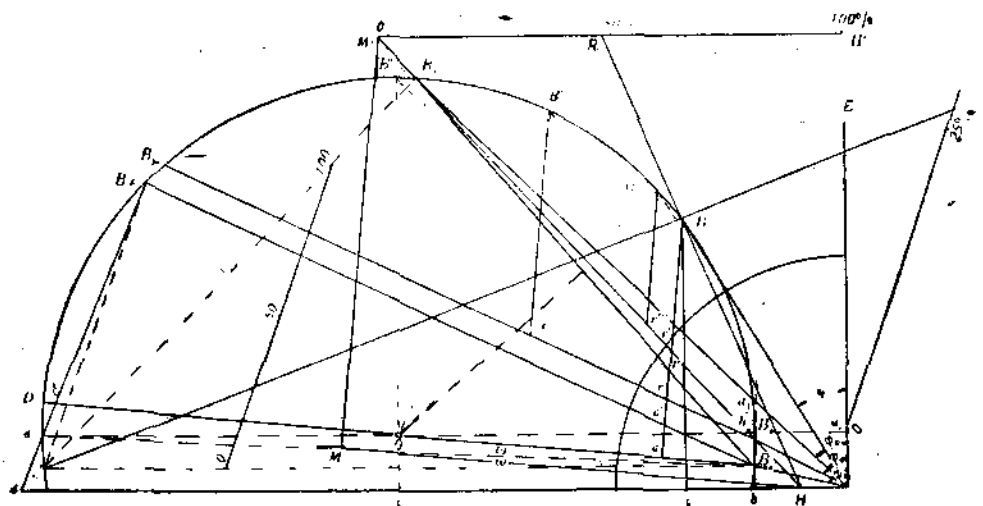
$$H = \frac{W_s \cdot r_1}{m_1 \cdot E_1^2}, \quad (298)$$

а B определяется по уравнению (291).

Координаты центра круга Сумес'а будут

$$a_s = \frac{ab}{1+H} \left(\frac{H}{K} + \frac{K}{B} \right) \quad (299)$$

$$b_s = \frac{ub}{1+H} \cdot \frac{1+2\tau}{2B(1+\tau)} \quad (300)$$



Фиг. 84.

Построенную по этим данным диаграмму мы будем называть диаграммой Оссанна-Сумес'а.

Практически, диаграмма Оссанна-Сумес'а, так же как и диаграмма Heyland'a строится по четырем величинам

$$I_0, I_k, \cos \varphi_0, \cos \varphi_k.$$

Построение этой диаграммы подробно показано на фиг. 84 и производится следующим образом ²⁾. От произвольной точки u , лежащей на горизонтали ud , откладываем в произвольном масштабе силы токов $I_0 = uB_0$ и $I_k = uB_k$ под соответствующими углами φ_0 и φ_k к вертикали uE . Точка B_0 не будет соответствовать синхронной скорости, так как при холостом ходе имеются потери на трение, вызывающие некоторое, хотя и очень небольшое, скольжение. Чтобы получить

¹⁾ См. ETZ, 1910 г., стр. 111, статья Сумес'а.

²⁾ Мы не будем за недостатком места доказывать правильность построений, как это мы делали при описании основной диаграммы Heyland'a, и отсылаем интересующихся к оригинальным работам Оссанна и Сумес'а, помещенным в ETZ за 1910 и др. годы.

точку, соответствующую синхронизму, опускаем из B_0 перпендикуляр на ud и на нем, в масштабе мощностей

$$C_p = m_1 E_1 \cdot C_{11}, \quad (301)$$

где масштаб токов

$$C_{11} = \frac{I_0}{u B_0}, \quad (302)$$

откладываем отрезок $B_0 B_1 = W_1$, равный потере на трение. Соединяя B_1 с u , получаем ток $u B_1 = I_1$, равный току при синхронной скорости двигателя.

Соединяем точки B_1 с B_2 и в середине отрезка $B_1 B_2$ восстанавливаем перпендикуляр ao , на котором должен лежать центр круга $\text{Sim} \epsilon \alpha$. Далее поступаем следующим образом. Через точку B_2 проводим линию $B_2 f$, параллельную к ud и под углом ω , тангенс которого

$$\text{tg } \omega = \frac{I_2 \cdot r_1 \cdot \sin \varphi_2}{E_1 - I_2 \cdot r_1 \cdot \cos \varphi_2} \quad (303)$$

(φ_2 и I_2 определяются из чертежа), откладываем линию $B_2 d_1$, а под углом 2ω — линию $B_1 D_1$. Можно доказать, что линия $B_1 D_1$ проходит через центр круга o . Найдя o , как точку пересечения прямых ao и $B_1 D_1$, описываем круг радиусом $o B_1$.

Практически, в виду малости углов ω , затрудняющих точное нахождение точек D_1 и d_1 , можно центр круга определять как точку пересечения прямой ao и прямой od_1 , являющейся перпендикуляром к середине отрезка, проведенного из точки B_1 перпендикулярно к ud , до пересечения с $u B_2$ в точке a_1 . Такое построение вполне допустимо, если

$$r_1 \approx r_2' \approx \frac{r_k}{2} \quad \text{и} \quad x_1 \approx x_2' \approx \frac{x_k}{2},$$

что в большинстве случаев и имеет место.

Далее через точку B_1 проводим прямую bb_1 , перпендикулярно к $B_2 d_1$. Тогда точка d определяется из пропорции

$$\frac{ud}{u_e d_e} = \frac{ub}{u_e b_e},$$

т.е.

$$ud = ub \cdot \frac{u_e d_e}{u_e b_e} \quad (304)$$

Соединяя точки d и d_e и продолжая линию dd_e до пересечения с окружностью, получаем точку B_∞ , соответствующую скольжению ¹⁾

$$s = \infty.$$

Точку B_∞ соединяем с B_2 ²⁾.

При нагрузке, соответствующей, напр., статорному току uB , полная потребляемая из сети мощность изобразится длиной перпендикуляра Bt , опущенного из B на ud , т.е.

$$P_s = C_p \cdot Bt \quad W \quad (305)$$

¹⁾ Такой случай имел бы место, если бы мы вращали ротор с бесконечно большой скоростью против направления вращения магнитного потока.

²⁾ Так как точка d лежит обычно очень близко к окружности, то такое построение при небольших размерах диаграммы может быть весьма неточным. Если $r_1 \approx r_2'$ и $x_1 \approx x_2'$, то точку B_∞ можно определить следующим образом. Из B_2 опускаем перпендикуляр на основании диаграммы и проводим из B_1 линию, делящую этот перпендикуляр в отношении $r_1 : r_2'$, подобно тому, как мы поступали при построении диаграммы Heyland'a (фиг. 81). Пересечение этой линии с окружностью и даст нам точку B_∞ .

Если бы трения не существовало, т.-е. точка B_s соответствовала бы полному току холостого хода, то, опустив из B перпендикуляр Bc на линию B_sD_s , мы получили бы:

мощность вращающегося потока

$$P_\phi = C_p \cdot Bv' W,$$

вращающий момент

$$M = \frac{0,975}{n} \cdot C_p \cdot Bv' \text{ mkg},$$

полезная мощность

$$P = C_p \cdot Br W.$$

При наличии же трения эти соотношения несколько изменятся. Мы будем считать, что сопротивление трения не зависит от скорости вращения и что, следовательно, необходимый для преодоления этого сопротивления вращающий момент остается при всех режимах работы постоянным. Таким образом, из вращающего момента

$$M = \frac{0,975}{n} \cdot C_p \cdot Bv'$$

нужно вычесть момент, преодолевающий трение

$$M_r = \frac{0,975}{n} C_p \cdot vv',$$

равный моменту

$$M_r = \frac{0,975}{n} \cdot C_p \cdot B_s B_s \dots \dots \dots (306)$$

при холостом ходе.

Это достигается проведением через B_o линии $B_o B_r$, параллельной $B_s B_o$. Тогда действительный момент вращения выразится

$$M = \frac{0,975}{n} \cdot C_p \cdot Bv \text{ mkg} \dots \dots \dots (307)$$

Что касается мощности, расходуемой на трение, то она, как видно из уравнения (306), при постоянном моменте изменяется пропорционально скорости вращения. При холостом ходе она

$$W_r = C_p \cdot B_o B_s W,$$

при коротком замыкании ($n = 0$)

$$W_r = 0.$$

Эту мощность можно, следовательно, учесть отрезком rr' , если B_o соединить с B_k .

Тогда мощность, передаваемая вращающемуся потоку,

$$P_\phi = C_p \cdot (Bv' - rr') W \dots \dots \dots (308)$$

и полезная мощность

$$P = C_p \cdot Br' W \dots \dots \dots (309)$$

Сила тока в статоре будет

$$I_1 = C_i \cdot uB \dots \dots \dots (310)$$

Сила тока в роторе, как и в диаграмме Heyland'a,

$$I_2 = (1 + \tau_1) C_i \cdot B_s B \dots \dots \dots (311)$$

Для определения скольжения выбираем какую-либо точку S на окружности и соединим ее прямыми с точками B_∞ , B_k и B_s . В произвольном месте проводим между отрезками SB_k и SB_s линию, параллельную SB_∞ , и делим ее на 100 частей. Тогда линия, соединяющая S с точкой B , даст нам скольжение в процентах. Масштаб скольжения можно увеличить точно так же, как мы это делали при построении диаграммы Heyland'a.

Коэффициент полезного действия определяется следующим образом: продолжим линию $B_k B_s$ до пересечения с ud в точке H . Из H проводим прямую HM произвольной длины (для удобства — 100 или 200 *mm*) параллельно $B_s D_s$ и из точки M восставляем перпендикуляр MM' до пересечения в точке M' с продолжением линии $B_k B_s$. Наконец, из M' проводим прямую $M'H$ параллельно ud , при чем

$$M'H = MH.$$

Разделив $M'H$ на 100 частей, для определения коэффициента полезного действия, проводим через данную точку B линию HBR .

Величина $\cos \varphi$ определяется так же, как и на диаграмме Heyland'a.

Что касается максимальных и минимальных значений, то на диаграмме Osappa-Simes'a они определяются так же, как и на диаграмме Heyland'a, а именно:

$(P_s)_{\max}$ будет в точке B' , соответствующей перпендикуляру к ud , проходящему через центр круга;

$(P_s)_{\min}$ — при холостом ходе;

$(M)_{\max}$ — в точке B'' , соответствующей перпендикуляру из центра круга на линию моментов $B_s B_k$;

$(M)_{\min} = 0$ — при холостом ходе (здесь мы рассматриваем лишь полезный момент вращения);

$(P)_{\max}$ — в точке B''' , соответствующей перпендикуляру из центра круга на линию мощностей $B_s B_k$;

$(P)_{\min} = 0$ — при холостом ходе и коротком замыкании;

$(\cos \varphi)_{\max}$ — в точке B , в которой вектор силы статорного тока касается окружности;

$(\eta)_{\min} = 0$ — при холостом ходе и коротком замыкании;

$(s)_{\max} = 1$ — при коротком замыкании;

$(s)_{\min} = 0$ — при синхронной скорости и

≈ 0 — при холостом ходе.

4. Диаграмма токов для однофазного двигателя.

При однофазной обмотке статора, как известно, получается в воздушном промежутке не вращающийся, а пульсирующий магнитный поток, благодаря чему начальный вращающий момент однофазного двигателя равен нулю. На основании теории двух вращающихся в различные стороны полей ¹⁾, однофазный двигатель можно рассматривать как агрегат, состоящий из двух совершенно одинаковых, сидящих на одном валу трехфазных двигателей, у которых статорные обмотки соединены последовательно (и, притом, так, что создаваемые ими поля вращаются в разные стороны) и роторные контактные кольца одного мотора соединены с роторными кольцами другого мотора.

Если включить оба последовательно соединенные статора на напряжение сети, то оба двигателя будут работать со скольжением в 100%, оба будут иметь на своих зажимах половинное напряжение сети, и статорные и роторные токи обоих моторов будут равны. Оба вращающих момента, которые равны по величине, но противоположны по направлению, при этом взаимно уничтожаются.

¹⁾ См., напр., Arnold.—Wechselstromtechnik, т. V, 1.

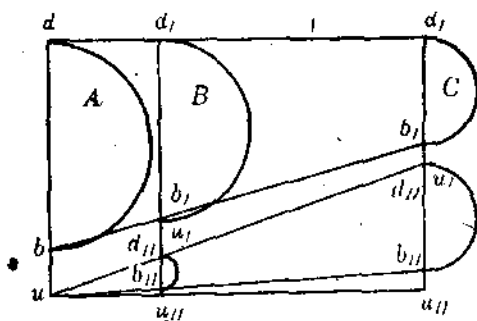
Если вал агрегата привести во вращение (в любую сторону) какой-либо внешней силой, то описанное равновесие нарушается; именно, один мотор работает со скольжением, меньшим 100%, а другой — с большим 100%. При этом мотор I получает перевес над мотором II не только потому, что он вращается в направлении своего поля, но и потому, что он развивает больший вращающий момент. Токи обоих роторов будут различны по величине и периодичности, и напряжение первого мотора возрастет за счет второго. Одинаковыми будут лишь статорные токи, так как статорные обмотки соединены последовательно.

Сумма скольжений обоих моторов составляет при всех режимах работы 200%, и поэтому при достижении мотором I синхронизма ($s_1 = 0$) скольжение второго мотора будет $s_2 = 200$. При скольжении агрегата $s = -\infty$, мы будем иметь

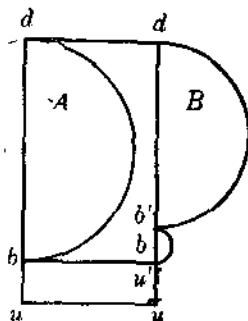
$$s_1 = -\infty \text{ и } s_2 = +\infty.$$

Предположим, что оба мотора работают при холостом ходе без потерь, т. е. их обмотки не имеют сопротивления. На фиг. 85А изображен круг Heyland'a для трехфазного двигателя с намагничивающим током ub ; тогда

$$\frac{ub}{bd} = \tau.$$



Фиг. 85.



Фиг. 86.

При последовательном соединении статоров двух таких моторов каждый из них получает лишь половину напряжения и каждый берет при разомкнутом роторе из сети намагничивающий ток. Поэтому для каждого мотора отношение (фиг. 85 С)

$$\frac{u_I b_I}{b_I d_I} = \frac{u_{II} b_{II}}{b_{II} d_{II}} = \tau$$

остается неизменным. Если мы диаметры и намагничивающие токи обоих моторов начертим в виде отрезков

$$b_I d_I = b_{II} d_{II} = \frac{bd}{2} \text{ и } u_I b_I = u_{II} b_{II} = \frac{ub}{2},$$

то для всех диаграмм фиг. 85 сохранятся одни и те же масштабы C_{dI} , C_{dII} , C_p .

Правая диаграмма (фиг. 85 С) справедлива для неподвижных моторов I и II и в том случае, если их роторы коротко замкнуты. Мы получаем тогда идеальное короткое замыкание, при котором статорные токи

$$I_{1kI} = I_{1kII} = u_I d_I = u_{II} d_{II} = \frac{ud}{2}$$

и роторные токи

$$I_{2kI} = I_{2kII} = b_I d_I = b_{II} d_{II} = \frac{bd}{2}.$$

Чтобы определить соотношения, которые имеют место при синхронизме мотора I ¹⁾, мы должны на постоянном отрезке ud построить две диаграммы трехфазных моторов, у которых статорные токи равны и для которых справедливо равенство

$$\frac{\text{намагничивающий ток}}{\text{диаметр круга}} = \tau.$$

На фиг. 85В изображены обе эти диаграммы, при чем их статорные токи равны, т.-е.

$$u_1 b_1 = u_{II} d_{II}$$

и отношения

$$\frac{u_1 b_1}{b_1 d_1} = \frac{u_{II} b_{II}}{b_{II} d_{II}} = \tau.$$

Кроме того

$$u_1 d_1 + u_{II} d_{II} = ud,$$

т.-е. напряжение распределяется между машинами в отношении

$$\frac{\text{напряжение мотора I}}{\text{напряжение мотора II}} = \frac{u_1 d_1}{u_{II} d_{II}}.$$

Мотор I находится в синхронизме, его статорный ток равен намагничивающему току $u_1 b_1$, и роторный ток равен 0, а мотор II находится в идеальном коротком замыкании, его статорный ток равен $u_{II} d_{II}$ и роторный ток, обладающий частотой $2f$, равен $b_{II} d_{II}$.

Перечертим диаграммы A и B так, как показано на фиг. 86, т.-е. изобразим диаграммы моторов I и II в другой последовательности. Тогда A представляет собой диаграмму первоначального трехфазного двигателя, а B изображает диаграмму этого же мотора при синхронизме, если его статорную обмотку питать однофазным током ²⁾. При этом мы можем предположить, что статорная обмотка мотора II помещена также на статоре мотора I, а роторная обмотка II — на роторе I. Ротор мотора I при синхронизме находится без тока, ротор же мотора II имеет ток bb' , и при совмещении обоих моторов в один, однофазный, мы получим, что в статоре его протекает ток

$$I_1 = ub',$$

а в роторе

$$I_2 = bb'.$$

Так как

$$\frac{ub}{bd} = \frac{uu'}{b'd} = \frac{u'b'}{b'd} = \frac{u'b}{bb'} = \tau,$$

то

$$\frac{b'd}{bd} = \frac{\text{диаметр окружности однофазного мотора}}{\text{диаметр окружности трехфазного мотора}} = \frac{1 + \tau}{1 + 2\tau} \dots (312)$$

$$\frac{ub'}{ub} = \frac{\text{намагничивающий ток однофазного мотора}}{\text{намагничивающий ток трехфазного мотора}} = \frac{2 + 2\tau}{1 + 2\tau} \dots (313)$$

$$\frac{ub'}{b'd} = \frac{\text{намагничивающий ток однофазного мотора}}{\text{диаметр окружности однофазного мотора}} = 2\tau \dots (314)$$

$$bb' = \frac{u'b'}{1 + \tau} = \frac{\tau}{1 + \tau} b'd = \frac{\tau}{1 + 2\tau} bd = \frac{ub}{1 + 2\tau} \dots (315)$$

Посмотрим теперь, каковы будут соотношения при скольжениях между 0 и 100%.

¹⁾ Мотор II, скольжение которого в этом случае равно 200%_н находится тогда в состоянии идеального короткого замыкания.

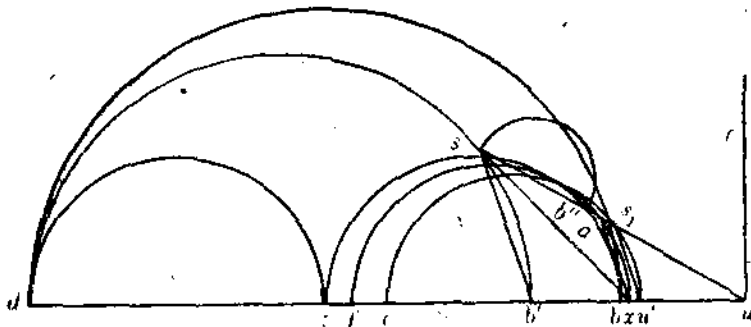
²⁾ Такой случай будет иметь место на практике, если одна из фаз трехфазного асинхронного двигателя, статор которого соединен звездой, разомкнется.

Сделаем предположение, что статорный ток us (фиг. 87) движется при изменении нагрузки по окружности $b'd$. На основании ud наносим уже известные нам из фиг. 86 точки u' , b , b' , описываем круг Heyland'a $b'd$ и откладываем статорный ток us , половина которого us_1 относится к мотору I, а другая половина s_2s — к мотору II. Геометрическим местом для s_1 будет круг диаметра $u's$, при чем точка s определяется идеальным коротким замыканием, так как всегда должны быть справедливы равенства

$$\begin{aligned} uu' &= u'b' \text{ (синхронизм),} \\ us_1 &= s_1s \text{ (произвольная нагрузка),} \\ us &= cd \text{ (идеальное короткое замыкание),} \end{aligned}$$

и таким образом

$$uc = \frac{ud}{2}.$$



Фиг. 87.

Мотор II всегда находится в состоянии короткого замыкания, и поэтому его роторный ток $b''s$ равен диаметру круга Heyland'a для мотора II. Геометрическим местом для b'' будет окружность с диаметром $b''e$, где точка e находится из условия

$$be = ed = \frac{bd}{2}.$$

При идеальном коротком замыкании ced представляет диаграмму мотора II, при чем, конечно,

$$\frac{ce}{ed} = \tau.$$

Вспомним (гл. VI, 1), что при идеальном коротком замыкании истинный роторный ток равен не просто диаметру круга Heyland'a, а умноженному на величину $(1 + \tau_1)$.

Поэтому роторный ток мотора II (на фиг. 87) будет равен $(1 + \tau_1) b''s = as$. Это умножение можно произвести графически, если мы определим геометрическое место точки a . При синхронизме ток короткого замыкания мотора II будет

$$xb' = (1 + \tau_1) \cdot bb',$$

а при идеальном коротком замыкании

$$fd = (1 + \tau_1) \cdot ed,$$

и, таким образом, геометрическим местом точки a будет круг с радиусом xf .

Для мотора I, роторный ток $u's_1$ может быть взят прямо из диаграммы, но и его при этом необходимо умножить на величину $(1 + \tau_1)$, чтобы получить его

истинное значение. Если и это умножение произвести графически, то мы должны начертить отрезки

$$u'x = \tau_1 \cdot uu' \quad \text{и} \quad s_1 a = \tau_1 \cdot us_1,$$

т.е. мы получаем уже известные нам точки x и a и роторный ток мотора I

$$xa = (1 + \tau_1) \cdot u's_1.$$

Таким образом:

а) при синхронизме

статорный ток мотора I		= uu'
роторный " " I		= 0
статорный " " II		= $u'b'$
роторный " " II		= $b'x$
статорный ток однофазного мотора		= $uu' + u'b' = ub$
роторный " " " "		= $0 + b'x = b'x$

б) при нагрузке

статорный ток мотора I		= us_1
роторный " " I		= ax
статорный " " II		= $s_1 s$
роторный " " II		= sa
статорный ток однофазного мотора		= $us_1 + s_1 s = us$
роторный " " " "		= $ax + sa = sx$ ¹⁾

в) при идеальном коротком замыкании

статорный ток мотора I		= uc
роторный " " I		= $xf = (1 + \tau_1) \cdot u'c$
статорный " " II		= cd
роторный " " II		= $fd = (1 + \tau_1) \cdot ed$
статорный ток однофазного мотора		= $uc + cd = ud$
роторный " " " "		= $xf + fd = xd$

Так как мотор II, находясь все время в коротком замыкании, потребляет только безваттный ток, то в отношении мощности однофазный двигатель имеет те же свойства, как и один мотор I. Поэтому казалось бы, что необходимы две диаграммы

для токов — диаграмма однофазного мотора $ub'd$,
для мощностей — диаграмма мотора I $uu'c$.

Но мы можем обойтись одной диаграммой $uu'c$, ибо она в геометрическом смысле подобна диаграмме однофазного мотора со статорным током us и фиктивным роторным током sb' , так как

$$\frac{uu'}{ub'} = \frac{uc}{ud} = \frac{us_1}{su} = \frac{s_1 u'}{sb'} = \frac{1}{2}.$$

Фиктивный ток sb' нам ненужен, и поэтому мы на диаграмме вычерчивать его не будем. Кроме того, мы можем отбросить все нам теперь ненужные линии и окружности и оставить только точки $u, x, b' d$ и круг Heyland'a $b'd$.

¹⁾ Черта над ax и sa обозначает, что суммирование производится геометрически.

5. Диаграмма Heyland'a для однофазных двигателей.

Диаграмма Heyland'a, подобно тому как и для трехфазных двигателей стронется здесь по четырем данным

$$I_0, I_k, \cos \varphi_0 \text{ и } \cos \varphi_k.$$

Откладываем (фиг. 88) под углами φ_0 и φ_k токи $I_0 = u'b$ и $I_k = u's'$, соединяем их линией $b's'$ и из середины ее m восстанавливаем перпендикуляр mo до пересечения с линией ud' , параллельной $u't'$ и проходящей через точку b' . Из точки o описываем радиусом ob' круг Heyland'a. Из b' , под углом α , тангенс которого ¹⁾

$$\operatorname{tg} \alpha = r_1 \cdot \frac{C_{i1}^2}{C_p} \cdot b'd'^2, \dots \dots \dots (316)$$

проводим линию $b'l$.

В уравнении (316):
масштаб статорного тока

$$C_{i1} = \frac{I_0}{u'b'} \dots \dots \dots (317)$$

масштаб мощностей

$$C_p = E_1 \cdot C_{i1} \dots \dots \dots (318)$$

Линию $b'l$ можно определить так же, как и на диаграмме трехфазного двигателя, если отрезок $s'q$ разделить на две части так, чтобы

$$\frac{nq}{s'q} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Для некоторой нагрузки статорный ток будет выражаться отрезком $u's$, а величина st' даст подводимую к мотору мощность. Мощность, идущая на покрытие потерь в железе, будет tt' , а мощность, идущая на покрытие потерь в статоре, — tv . В то время как при холостом ходе трехфазного мотора его роторный ток равен нулю, в однофазном двигателе он будет иметь некоторую величину, равную току короткого замыкания мотора II. Этот ток не будет чисто безваттным, как мы предполагали в предыдущем параграфе при рассмотрении идеального короткого замыкания, так как в действительности ротор обладает некоторым омическим сопротивлением. Ваттный же ток вызовет потерю мощности, которая может быть найдена из формулы

$$2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = 2 \cdot r_2 (C_{i2} \cdot xb')^2 = b'c \cdot C_p \dots \dots \dots (319)$$

Точка x определяется отрезком

$$xu = x'u' = (1 + \tau_1) \tau \cdot b'd'.$$

Так как обычно

$$\tau_1 \approx \tau_2,$$

то можно считать, что

$$1 + \tau_1 = 1 + \tau_2 = \sqrt{1 + \tau}, \dots \dots \dots (320)$$

где τ определяется выражением

$$\tau = \frac{I_\mu}{I_{k1} - I_\mu}.$$

Масштаб

$$C_{i2} = C_{i1} \cdot \frac{w_1 \cdot f_1}{2 \cdot w_2 \cdot f_2} \dots \dots \dots (321)$$

¹⁾ См. гл. VI, 2.

²⁾ Здесь r_1 — сопротивление всей обмотки статора.

6. Диаграмма Оссаппа-Сумес'а для однофазных двигателей.

Построение этой диаграммы аналогично ее построению для трехфазных двигателей (гл. VI, 3).

От точки u (фиг. 89), под углами φ_0 и φ_k , откладываем токи

$$I_0 = uB_0 \quad \text{и} \quad I_k = uB_k.$$

От точки B_0 по вертикали вниз откладываем потерю трения

$$W_r = B_0 B_s \cdot C_p,$$

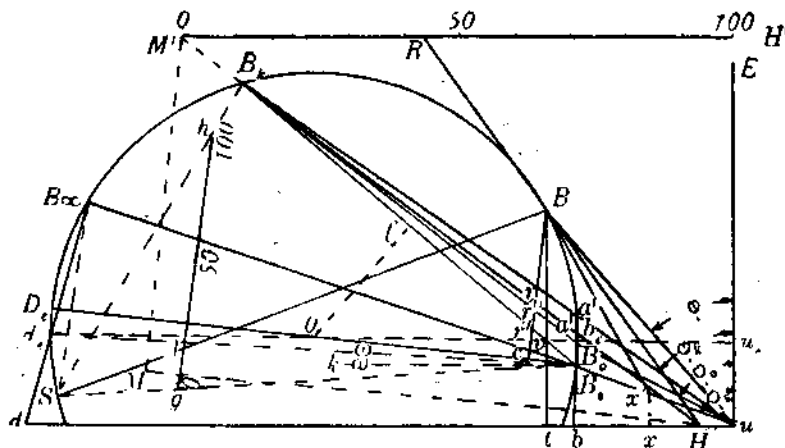
где

$$C_p = E \cdot C_{11},$$

а

$$C_{11} = \frac{I_0}{uB_0}.$$

Точку B_s соединяем с B_k и из середины линии $B_k B_s$ восстанавливаем перпендикуляр fo , на котором должен лежать круг Сумес'а.



Фиг. 89.

Через точку B_s проводим линию $B_s k$, параллельную к ud и под углом ω , тангенс которого

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{I_{r1} \cdot \sin \varphi_s}{E_1 - I_{r1} \cdot \cos \varphi_s}, \quad \dots \dots \dots (322)$$

откладываем линию $B_s d_s$, а под углом 2ω — линию $B_s D_s$. Центр круга o лежит на пересечении прямых fo и $B_s D_s$. Радиусом oB_s описываем круг Сумес'а.

Здесь точно так же как и на диаграмме для трехфазного двигателя, практически можно определять центр круга, как пересечение fo и прямой, параллельной оси абсцисс, являющейся вместе с тем перпендикуляром к середине отрезка, проведенного перпендикулярно к оси абсцисс от точки B_s до пересечения с линией uB_k .

Через точку B_s проводим прямую $b_s b$, перпендикулярно к $B_s d_s$. Тогда точка d определится из равенства

$$ud = ub' \frac{u d_s}{u b_s} \quad \dots \dots \dots (323)$$

Соединив точки d и d_s и продолжив линию dd_s до пересечения с окружностью, получим точку B_∞ для скольжения

$$s = \infty.$$

Точку B_∞ соединяем с B_1 ¹⁾.

При нагрузке B полная, потребляемая статором, мощность изобразится длиной перпендикуляра Bt , опущенного из B на ud , т.е.

$$P_s = C_p \cdot Bt \dots \dots \dots (324)$$

Соединив B_0 с B_1 , мы отрезком $r'r''$, лежащим на линии B , перпендикулярной к $B_1 D_1$, учитываем потерю мощности на трение, т.е.

$$W_r = C_p \cdot r'r'' \dots \dots \dots (325)$$

Наконец, отложив на продолжении $B_1 B_0$ отрезок $B_0 a_1$, соответствующий мощности, теряемой на прохождение тока в роторе при холостом ходе (см. формулу 319), и соединив a_1 с B_1 , мы получим линию мощностей и вращающих моментов. Как указано в § 5, в большинстве случаев величиной отрезка $B_0 a_1$ можно пренебрегать и считать, что линия мощностей и моментов проходит через точку B_0 .

Точка x определяется из выражения

$$xu = (1 + \tau_1) \tau \cdot bd \approx \tau \sqrt{1 + \tau} \cdot bd, \dots \dots \dots (326)$$

а точка x' лежит на пересечении uB_0 с линией, проведенной через x и параллельной bb_0 .

Из диаграммы ясно, что при учете потерь в меди ротора мы пренебрегаем составляющей xb роторного тока, а принимаем во внимание лишь фиктивный ток bB ²⁾, т.е. совершаем по отношению к роторному току ту же ошибку, что и в диаграмме Heyland'a — по отношению к статорному току, однако, ошибка эта весьма невелика и практически не имеет значения.

Масштаб роторного тока определяется по уравнению (321).

Таким образом, из диаграммы мы получаем:

ток в статоре	$I_1 = C_{11} \cdot uB \text{ A};$
ток в роторе	$I_2 = C_{12} \cdot x'B \text{ A};$
потребляемую мощность	$P_s = C_p \cdot Bt \text{ W};$
полезную мощность	$P = C_p \cdot Br \text{ W};$
вращающий момент	$M = \frac{0,975}{n} \cdot C_p \cdot Br \text{ mkg};$
скольжение	$s = gl \text{ \%};$
коэффициент полезного действия	$\eta = M'R \text{ \%}.$

Здесь, как было указано выше, можно пренебречь отрезком $B_0 a_1$ и за линию мощностей и моментов брать линию $B_0 B_1$. Тогда полезная мощность выразится отрезком $Br'' \cdot C_p$ и вращающий момент — отрезком $Br'' \cdot C_p \frac{0,975}{n}$.

Построения, служащие для определения скольжения, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности, остаются совершенно такими же, как и в диаграмме Ossanna-Simes'a для трехфазных двигателей.

7. Рабочие кривые асинхронных двигателей.

Являясь весьма удобным средством для исследования двигателя при всех режимах его работы, круговые диаграммы сами по себе не дают достаточно наглядного представления, пригодного для непосредственной оценки изменения различных факторов, в зависимости от нагрузки машины.

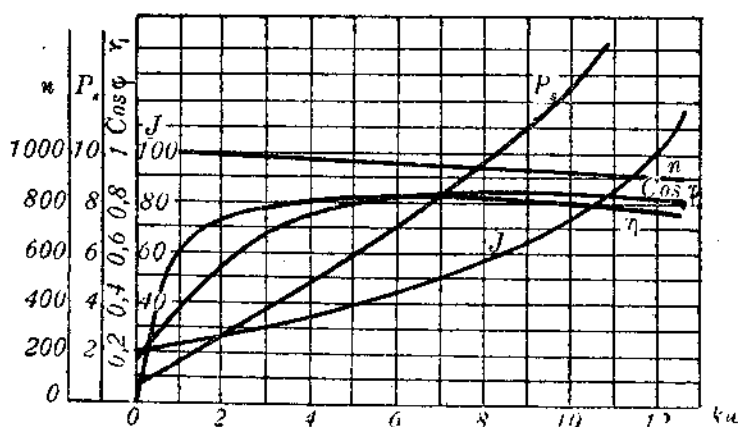
¹⁾ Здесь также можно пользоваться упрощенным методом определения B_∞ , указанным в сноске на стр. 137, но перпендикуляр нужно делить в отношении $r_1 : 2r_2'$.

²⁾ Линия $b'B$ на фиг. 89 не проведена.

Для последней цели обычно пользуются так называемыми рабочими кривыми, для получения которых наносят в прямоугольных координатах, в зависимости от полезной мощности, взятые из диаграммы значения:

силы тока в статоре	I_1	} $= f(P)$.
потребляемой мощности	P_s	
вращающего момента	M	
скольжения	s	
или числа оборотов	n	
коэффициента мощности	$\cos \varphi$	
коэффициента полезного действия	η	

На фиг. 90 представлены рабочие кривые трехфазного асинхронного двигателя, полезная мощность (нормальная) которого составляет около 7,5 kW.



Фиг. 90.

Обычно по оси абсцисс откладывают полезные мощности не только до нормальной величины, но и до максимальной перегрузки.

На фиг. 90 кривые для M и s не нанесены.

Чтобы получить наглядное представление об изменении всех указанных выше величин не только в пределах обычной работы, но и для момента короткого замыкания (соответствующего пуску в ход при полном напряжении и коротко замкнутом роторе), а также для периода времени, соответствующего „разворачиванию“ двигателя, рекомендуется нанести те же величины в зависимости от скольжения (от $s = 0$ до $s = 1$).

Ясно, что первое семейство кривых соответствует небольшому участку второго семейства с увеличенным масштабом абсцисс, так как при изменении нагрузки от 0 до максимальной скольжение изменяется в сравнительно небольших пределах.

Г Л А В А VII.

Нагревание асинхронных двигателей.

1. Нагревание статора.

Все имеющее место в статоре потери превращаются в теплоту, обуславливающую нагревание железа статора и его обмотки.

После пуска холодного двигателя в ход, температура его постепенно повышается, пока не будет достигнуто стационарное состояние, при котором все выделяющееся тепло передается в окружающую среду и, следовательно, устанавливается определенная, постоянная температура двигателя ¹⁾. Точное определение этой температуры весьма затруднительно и даже едва ли возможно. Однако, для практических целей вполне достаточно пользоваться приближенной формулой

$$t_s = C_s \cdot \frac{W_s}{O_s} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (327)$$

Эта формула вполне справедлива лишь для однородного тела и в ней:

t_s — превышение температуры статора над температурой окружающей среды,
 C_s — постоянная, зависящая от условий охлаждения,
 W_s — сумма потерь в статоре в ваттах,
 O_s — поверхность охлаждения в cm^2 .

Сумма потерь, имеющих место в статоре, складывается из потерь в железе

$$(W_h)_{as} + (W_h)_{zs} + (W_f)_{as} + (W_f)_{zs} + (W_o)_s + (W_p)_s \quad (328)$$

и омических потерь в той части обмотки, которая заложена в железо статора

$$\frac{l}{l_{a1}} m_1 I_1^2 \cdot r_1 \quad (329)$$

Таким образом

$$W_s = (W_h)_{as} + (W_h)_{zs} + (W_f)_{as} + (W_f)_{zs} + (W_o)_s + (W_p)_s + \frac{l}{l_{a1}} \cdot m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \quad (330)$$

Поверхность охлаждения статора определяется из формулы

$$O_s = \pi (D + 2h_{n1} + 2h_s) (l - bL) + \frac{\pi}{4} [(D + 2h_{n1} + 2h_s)^2 - D^2] (2 + b) = \\ = \pi (D + 2h_{n1} + 2h_s) (l - bL) + \pi (h_{n1} + h_s) (D + h_{n1} + h_s) (2 + b) \text{ cm}^2 \quad (331)$$

Наконец, величина C_s для двигателей открытого типа колеблется в пределах от 200 до 300, при чем C_s будет тем больше, чем меньше $\frac{l}{D}$. Для совершенно закрытых двигателей, величина $C_s = 300 - 450$.

Найденная по уравнению (327) температура не должна превышать

$$\left. \begin{aligned} t_s &\leq 45 - 80^\circ\text{C} \text{ по русским нормам} \\ t_s &\leq 40 - 80^\circ\text{C} \text{ по германским нормам} \end{aligned} \right\} \text{ в зависимости от рода изоляции обмотки (см. гл. I, 11).}$$

Кроме повышения температуры статорного железа, следует еще проверить повышение температуры самой обмотки, так как слишком сильное нагревание может

¹⁾ Эта температура остается постоянной, конечно, лишь в том случае, если развиваемая двигателем мощность (нагрузка) также будет все время оставаться постоянной.

вызвать обугливание изоляции, в результате чего может возникнуть короткое замыкание и порча обмотки.

Если изоляция впадин имеет такую толщину, что теплообмен между медью и железом не имеет места, то выделяемая в обмотке теплота отводится лишь через лобовые соединения, благодаря чему температура меди в середине статора будет больше. В действительности, однако, указанный теплообмен всегда существует, и поэтому разница в температурах будет меньше, а при некоторых условиях может исчезнуть совсем или даже получиться обратной, т.-е. в середине температура будет меньше, чем в лобовых соединениях.

Так как в двигателях низкого напряжения (до 380 В) изоляция впадины весьма тонка, то здесь теплообмен настолько значителен, что практически температуры меди и железа будут одинаковы и надобность в указанной проверке отпадает.

Если считать, что температура железа статора повсюду имеет одинаковую величину, и если пренебречь влиянием охлаждающих щелей, то максимальное превышение температуры меди над температурой окружающей среды можно определить по формуле ¹⁾

$$t_{K \max} = 2A + \frac{b}{a^2} + t_s \text{ } ^\circ\text{C} \quad (332)$$

Здесь A — коэффициент, определяемый из двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} a \cdot A \cdot \operatorname{Sin} \frac{a \cdot l_r}{2} &= -c \cdot C \cdot \operatorname{Sin} \frac{c \cdot l_k}{2} \\ 2A \cdot \operatorname{Cos} \frac{a \cdot l_r}{2} + \frac{b}{a^2} t_s &= 2C \cdot \operatorname{Cos} \frac{c \cdot l_k}{2} + \frac{d}{c^2} \end{aligned} \right\} \quad (333)$$

(гиперболические функции Sin и Cos могут быть взяты по таблицам, имеющимся в Hütte, где они обозначены, как $\sin h$ и $\cos h$).

Величины

$$a^2 = \frac{U_n \cdot \lambda_i}{\delta_i \cdot \lambda_{Cu} \cdot q_n} - \frac{0,004 \cdot \gamma \cdot \rho \cdot \Delta_1^2}{\lambda_{Cu}} \quad (334)$$

$$b = \frac{\Delta_1^2 \cdot \gamma \cdot \rho [1 + 0,004 \cdot (t_s + t_0)]}{\lambda_{Cu}} \quad (335)$$

$$c^2 = \frac{U_k \cdot \frac{1}{\lambda_{Cu} \cdot q_n}}{\frac{\delta_n}{\lambda_a} + \frac{1}{H \left(1 + \frac{p}{100} \cdot 0,1 \cdot v \right)}} - \frac{0,004 \cdot \gamma \cdot \rho \cdot \Delta_1^2}{\lambda_{Cu}} \quad (336)$$

$$d = \frac{\Delta_1^2 \cdot \gamma \cdot \rho (1 + 0,004 \cdot t_i)}{\lambda_{Cu}} \quad (337)$$

В этих формулах

U_n — периметр поперечного сечения впадины в см;

δ_i — толщина изоляционного слоя между медью и железом (изоляция впадины + изоляция обмотки) в см;

λ_i — средняя теплопроводность изоляционного слоя между медью и железом $\approx 7 \cdot 10^{-4}$;

λ_{Cu} — теплопроводность меди $\approx 300 \cdot 10^{-4}$ (на mm^2);

q_n — полное поперечное сечение меди в одной впадине в mm^2 ;

γ — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение тока по проводнику [уравнения (77) и (78)];

¹⁾ Вывод этой формулы см. Arnold — Wechselstromtechnik, T. V, 1, стр. 226 и след.

- ρ — удельное сопротивление меди на cm и $mm^2 = \frac{1}{5700}$;
 Δ_1 — плотность тока в проводниках статора в A/mm^2 ;
 l_r — длина изоляционной трубки между обмоткой и впадиной =
 $= l + (1,0 \div 3,0) cm$;
 l_k — длина лобового соединения = $l_a - l_r$ cm ;
 δ_a — толщина изоляции лобового соединения в cm ;
 λ_a — средняя теплопроводность изоляционного слоя лобовых соединений $\approx 12 \cdot 10^{-4}$;
 H — коэффициент теплоотдачи в воздух от лобового соединения $\approx 12 \cdot 10^{-4}$;
 p — процентное отношение скорости воздуха, омывающего лобовые соединения к окружной скорости ротора $\approx 50\%$;
 v — окружная скорость ротора в $m/сек$;
 t_s — температура слоя воздуха, прилегающего к лобовым соединениям $\approx t_s + 18$;
 U_k — периметр поперечного сечения одного лобового соединения в cm ;
 t_0 — температура окружающей среды, обычно $\approx 20^\circ$.

Подставляя значения λ_r , λ_{ca} , λ_a , ρ , H , p , t_s в уравнения (334 — 337), получим:

$$a^2 = 234 \left(\frac{U_n}{\delta_r \cdot q_n} - \frac{\gamma \cdot \Delta_1^2}{1000} \right) 10^{-4} \quad (338)$$

$$b = \gamma \frac{0,94 + 0,004 \cdot (t_s + 18)}{170} \cdot \Delta_1^2 \quad (339)$$

$$c^2 = \frac{U_k}{25 \left(\delta_a + \frac{1}{1 + 0,05 \cdot v} \right) q_n} - 0,234 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma \cdot \Delta_1^2 \quad (340)$$

$$d = \gamma \frac{0,94 + 0,004 \cdot (t_s + 20)}{170} \cdot \Delta_1^2 \quad (341)$$

Среднее превышение температуры меди над окружающей средой

$$(t_K)_{cp} = \frac{1}{l_r} \left(\frac{2A}{a} \sin \frac{al_r}{2} + \frac{b}{a^2} \cdot \frac{l_r}{2} \right) + \frac{1}{l_k} \left(\frac{2C}{c} \sin \frac{cl_k}{2} + \frac{d}{c^2} \cdot \frac{l_k}{2} \right) + \frac{t_s}{2} \quad ^\circ C \quad (342)$$

2. Нагревание ротора.

Повышение температуры ротора может быть найдено из выражения

$$t_R = C_R \cdot \frac{W_R}{O_R(1 + 0,1 \cdot v)} \quad (343)$$

Здесь W_R — потеря в роторе, равная

$$(W_o)_r + (W_p)_r + \frac{l}{l_{a2}} m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \quad (344)$$

(для однофазных двигателей $m_2 = 2$);

O_R — поверхность охлаждения ротора, равная

$$\left. \begin{aligned} & \pi (D - 2\delta) (l - bL) + \frac{\pi}{4} [(D - 2\delta)^2 - (D - 2\delta - 2h_{a2} - 2h_r)^2] (2 + b = \\ & = \pi (D - 2\delta) \cdot (l - bL) + \pi (h_{a2} + h_r) [(D - 2\delta) - h_{a2} - h_r] (2 + b) cm^2 \end{aligned} \right\} \quad (445)$$

C_R — коэффициент, зависящий от условий охлаждения и равный, в среднем, 400 — для открытых и 600 — для закрытых двигателей.

Полученная по уравнению (343) температура не должна превышать.

$$\left. \begin{aligned} t_R & \leq 45 - 80^\circ C \text{ по русским нормам} \\ t_R & \leq 40 - 80^\circ C \text{ по германским нормам} \end{aligned} \right\} \text{ в зависимости от рода изоляции обмотки (см. гл. I, 11).}$$

3. Нагревание подшипников.

Повышение температуры подшипников можно определять при скоростях $v_2 \leq 5$ м/сек. по уравнению Dettmar'a

$$t_2 \approx \frac{(W_r)_2' \cdot 5}{\pi \cdot d_2 \cdot l_2} \text{ } ^\circ\text{C} \dots \dots \dots (346)$$

при скоростях от 5 до 20 м/сек., по уравнению Lasche

$$t_2 \approx \frac{(W_r)_2' \cdot 100}{\pi \cdot d_2 \cdot l_2} \text{ } ^\circ\text{C} \dots \dots \dots (347)$$

где $(W_r)_2'$ — потери одного подшипника.

Определяемая по этим уравнениям температура не должна превышать:

по русским нормам	45° C
по германским нормам	45° C.

Если t_2 получается выше, то требуется устройство для искусственного охлаждения подшипников.

4. Расчет искусственного охлаждения машины.

Для многих машин, у которых естественная вентиляция невозможна (машины закрытого типа) или у которых поверхность охлаждения по сравнению с их мощностью относительно мала (турбомоторы), приходится прибегать к искусственному охлаждению с помощью крыльчатого вентилятора, сидящего на валу машины, или особого компрессора, обслуживающего обычно несколько машин сразу.

Обозначим

α — коэффициент расширения воздуха $= \frac{1}{273} \approx 0,0037$;

c — удельная теплота, равная при $0 \div 100^\circ\text{C}$ $0,237 \text{ Cal/kg } ^\circ\text{C}$;

γ_1 — удельный вес воздуха $= 1,293 \text{ kg/m}^3$;

W_t — количество тепла, выделяемое в машине, в kW;

t — желаемое превышение температуры над температурой окружающей среды (обычно около 50°C);

t_0 — температура подводимого воздуха (обычно около $15^\circ - 20^\circ\text{C}$).

Тогда количество воздуха, которое должно быть проведено через машину в одну секунду, будет выражаться уравнением

$$\left. \begin{aligned} Q' &= \frac{0,24 \cdot W_t (1 + \alpha t)}{c \cdot \gamma_1 (t - t_0)} = \frac{0,24 \cdot W_t (1 + 0,0037t)}{0,237 \cdot 1,293 (t - t_0)} \approx \\ &\approx \frac{0,78 \cdot W_t (1 + 0,0037t)}{(t - t_0)} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (348)$$

или в минуту

$$\left. \begin{aligned} Q &= \frac{0,24 \cdot W_t (1 + \alpha t) \cdot 60}{c \cdot \gamma_1 \cdot (t - t_0)} = \frac{0,24 \cdot W_t (1 + 0,0037t) \cdot 60}{0,237 \cdot 1,293 \cdot (t - t_0)} \approx \\ &\approx \frac{46,5 \cdot W_t (1 + 0,0037t)}{t - t_0} \text{ м}^3/\text{мин.} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (349)$$

При этом мы не принимаем во внимание излучение теплоты поверхностью машины, чем достигается большая надежность расчета.

Величина W_t представляет собой все потери машины, кроме потерь в тех частях, которые не омываются непосредственно воздухом, нагнетаемым от вентилятора, другими словами, кроме потерь в подшипниках, на вентиляцию, а также и в кольцах, если только последние не расположены внутри машины.

Окружная скорость лопастного колеса определяется по уравнению

$$v_t = k \sqrt{g \cdot h \cdot \gamma'_t} \text{ м/сек.}, \dots \dots \dots (350)$$

где k — коэффициент, который для прямых лопастей $\approx 3,2$, а для изогнутых $\approx 2,6$;
 g — ускорение силы тяжести $= 9,81 \text{ м/сек}^2$;
 h — давление воздуха в mm водяного столба, равное для тихоходных машин ($v \approx 15 \text{ м/сек.} - 30 \div 50 \text{ мм}$, а для быстроходных машин ($v \approx 80 \text{ м/сек.} - 50 \div 100 \text{ мм}$);
 γ'_t — удельный объем воздуха средней влажности $\approx 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Зная окружную скорость, найдем диаметр колеса

$$D_t = \frac{v_t \cdot 60 \cdot 100}{\pi \cdot n} \text{ см} \dots \dots \dots (350a)$$

Ширину лопастей можно определять по уравнению

$$b_t = (0,2 \div 0,5) \cdot D_t \dots \dots \dots (350b)$$

Если колеса располагаются по обеим сторонам ротора, то каждое колесо берут половинной ширины.

Мощность, необходимая для работы вентилятора, составляет

$$P_t = 9,81 \frac{Q' \cdot h}{\eta_t} \approx 10 \frac{Q' \cdot h}{\eta_t} \text{ Вт}, \dots \dots \dots (351)$$

где Q' — секундный расход воздуха в $\text{м}^3/\text{сек.}$ и h — высота водяного столба в mm .

Коэффициент полезного действия вентилятора может быть принят равным

для больших вентиляторов $\dots \dots \dots \eta_t = 0,4 \div 0,7$,
 для малых вентиляторов $\dots \dots \dots \eta_t = 0,2 \div 0,4$.

Г Л А В А VIII.

Аномальные конструкции асинхронных двигателей.

1. Совершенно закрытые двигатели.

Для работы в очень сырых или пыльных помещениях, а также при работе на открытом воздухе применяются, большей частью, совершенно закрытые двигатели.

Развиваемая в этом случае внутри двигателя теплота может отдаваться в окружающую среду исключительно путем излучения от внешней поверхности машины, благодаря чему теплообмен сильно затрудняется. Поэтому здесь необходимо уменьшить выделение тепла, т.е. уменьшить потери двигателя, для чего при расчете необходимо задаваться более низкими значениями плотностей тока и магнитных индукций, чем для нормальных, открытых машин. Другими словами, при одинаковом повышении температуры и при одинаковых линейных размерах мощность закрытого двигателя будет значительно меньше, чем открытого, и обычно составляет только 50 — 60% мощности последнего. С помощью устройства охлаждающих ребер эту мощность можно повысить до 60 — 70%, а с помощью так называемой охлаждающей рубашки — даже до 80% (а в последних конструкциях — даже до 90 — 100%). Все эти приспособления применяются, однако, в двигателях сравнительно большой мощности, для малых же и средних машин заводы, в целях удешевления, предпочитают использовать нормальные корпуса (с приспособленными крышками) за счет уменьшения мощности.

Считая, что в небольших двигателях можно использовать 65%, а в средних — 50% мощности, мы получим следующие величины для AS и B :

двигатели средней величины

$$\left. \begin{array}{l} AS = 0,75 \\ B = 0,67 \end{array} \right\} \text{от нормальных величин,}$$

малые двигатели (до 1 kW)

$$\left. \begin{array}{l} AS = 0,85 \\ B = 0,76 \end{array} \right\} \text{от нормальных величин.}$$

В том же соотношении, что и AS , должны быть уменьшены плотности тока. Вследствие худшего использования к. п. д. и коэффициент мощности закрытых двигателей будут на 1—3% меньше, чем для обычных нормальных конструкций. В остальном расчет этих двигателей ничем не отличается от нормальных.

2. Двигатели для кратковременной работы.

При указании мощности двигателя нормально подразумевается, что она развивается мотором в течение длительного (свыше 2 час.) времени без повышения температуры за пределы, установленные нормами.

Если рассчитанный на длительную работу двигатель будет работать с перерывами или короткое время (< 2 час.), то его предельная температура никогда не будет достигнута, т.-е. двигатель останется неиспользованным. В этом случае мы могли бы взять большие значения для AS и B для того, чтобы нагрев машины был нормальным. Было бы неправильным брать в этом случае двигатель меньшей мощности и перегружать его, так как таким путем мы повысили бы лишь нагруженность меди, но не железа, ибо величина магнитного потока почти не зависит от нагрузки. В виду этого для прерывистой работы нужно применять двигатели, специально рассчитанные для такого режима.

Опытным путем установлены коэффициенты увеличения нагруженности меди и железа, и произведение этих коэффициентов мы будем называть повышением использования.

Нормами, одобренными IX ВЭС, стандартизованы следующие виды кратковременной работы 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120 мин.

В практике встречаются большей частью следующие типы кратковременной работы:

- 100-минутная работа,
- 60-минутная (часовая) работа,
- 40-минутная работа (крановые моторы),
- 30-минутная работа.

Эти термины следует понимать так, что двигатель, рассчитанный на n -минутную работу, достигнет нормального повышения температуры через n минут непрерывной полной нагрузки. В действительности, благодаря частым остановкам, во время которых двигатель будет охлаждаться, он сможет работать значительно дольше, и его предельная температура будет достигнута лишь через несколько часов.

Для коэффициентов увеличения можно пользоваться следующими опытными данными.

Характер работы в мин.	Коэффициент увеличения для			Повышение использования
	AS и Δ	B_i	B_e и B_a	
100'	1,12	1,10	1,07	1,24
60'	1,22	1,19	1,13	1,45
40'	1,27	1,22	1,16	1,55
30'	1,34	1,26	1,20	1,70

ГЛАВА IX.

Определение веса машины и расчет отдельных частей машины на механическую прочность.

1. Определение веса машины.

а) Статор.

Вес статора складывается из веса железа $(G_{Fe})_a$ и веса меди $(G_{Cu})_a$.

Вес железа определяется формулой

$$(G_{Fe})_a = G_{a1} + G_{a2} \dots \dots \dots (352)$$

Вес меди

$$(G_{Cu})_a = 2w_1 \cdot m_1 \cdot l_{a1} \cdot q_s \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \dots \dots \dots (353)$$

где l_{a1} — длина половины статорного витка в см,

q_s — сечение проводника в mm^2 .

Таким образом полный вес статора

$$G_s = (G_{Fe})_a + (G_{Cu})_a \dots \dots \dots (354)$$

б) Ротор.

Вес ротора

$$G_R = (G_{Fe})_r + (G_{Cu})_r + G_n + G_s + G_k \dots \dots \dots (355)$$

Здесь $(G_{Fe})_r$ — вес железа ротора, равный

$$(G_{Fe})_r = G_{ar} + G_{br} = 24,5 \cdot l_0 \cdot h_r (D - 2\delta - 2h_{n2} - h_r) 10^{-3} + \left[\begin{aligned} &+ 7,8 \cdot l_0 \cdot h_{n2} [(D - 2\delta - h_{n2}) \pi - u_2 b_{n2}] 10^{-3} \text{ kg} \end{aligned} \right] \dots \dots (356)$$

$(G_{Cu})_r$ — вес меди ротора, равный

$$(G_{Cu})_r = 2w_2 \cdot m_2 \cdot l_{a2} \cdot q_r \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \dots \dots \dots (357)$$

G_n — вес вала,

G_s — вес вспомогательных деталей, служащих для укрепления ротора на валу,

G_k — вес контактных колец.

Величины G_n , G_s и G_k подсчитываются по эскизам.

с) Активные веса.

Общий вес активного железа

$$G_{Fe} = (G_{Fe})_a + (G_{Fe})_r \dots \dots \dots (358)$$

Общий вес активной меди

$$G_{Cu} = (G_{Cu})_a + (G_{Cu})_r \dots \dots \dots (359)$$

Полный вес активного материала

$$G_{ak} = G_{Fe} + G_{Cu} \text{ kg} \dots \dots \dots (360)$$

д) Весовые отношения.

Если полный вес машины

$$G_A = G_s + G_R \text{ kg} \dots \dots \dots (361)$$

то коэффициент конструктивного совершенства

$$K = \frac{G_{ak}}{G_A} \dots \dots \dots (362)$$

Веса, приходящиеся на 1 kW:

для активной меди

$$g_{Cu} = \frac{G_{Cu}}{P} \text{ кг/кВт} \quad (363)$$

для активного железа

$$g_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P} \text{ кг/кВт} \quad (364)$$

для активного материала

$$g_{ak} = \frac{G_{ak}}{P} \text{ кг/кВт} \quad (365)$$

для полного веса машины

$$g_A = \frac{G_A}{P} \text{ кг/кВт} \quad (366)$$

2. Вал и цапфы.

а) Расчет вала для моторов, имеющих непосредственное сцепление с рабочей машиной.

В этом случае, как видно из фиг. 91, на вал действует с одной стороны сила

$$G = G_R - 0,5 G_n + G_0 \quad (367)$$

где G_n — вес самого вала¹⁾ и G_0 — сила одностороннего магнитного притяжения, а с другой стороны на часть вала между соединительной муфтой и ступицей ротора действует крутящий момент M_d .

Сила одностороннего магнитного притяжения, возникающая вследствие того, что благодаря прогибу вала и истиранию подшипников ротор не расположен вполне концентрично со статором машины, может быть подсчитана по формуле Rosenberga²⁾ следующим образом

$$G_0 = a_1 \cdot \pi \cdot D \cdot l_0 \left(\frac{B_l}{5000} \right)^2 \cdot \frac{f_n}{\delta} \text{ кг},$$

где f_n — стрелка прогиба вала, которая не должна превышать $0,1 \cdot \delta$.

В турбомоторах стрелка прогиба вала должна быть выбрана так, чтобы не могли возникнуть опасные колебания вала. Как показал Фёрри, колебания вала достигают наибольших размеров при так называемом критическом числе оборотов, определяемом выражением

$$n_k = \frac{300}{\sqrt{f_n}} \quad (368)$$

Таким образом, если задаться критическим числом оборотов, которое для турбомоторов должно быть на $30 \div 40\%$ больше или меньше (последнее для больших машин при 3000 об./мин.), т.е.

$$n_k = (1,3 \div 1,4)n \text{ или } n_k = (0,6 \div 0,7)n \quad (369)$$

то легко по уравнению (368) определить максимальную допускаемую стрелку прогиба

$$f_{n \max} = \frac{90000}{n_k^2} \text{ см} \quad (370)$$

Величина $f_{n \max}$ как мы уже сказали, не должна превышать $0,1 \cdot \delta$.

¹⁾ Так как вес вала представляет собой приблизительно равномерную нагрузку, то при расчете вала этот вес можно заменить сосредоточенной силой, равной, как известно из теории сопротивления материалов, $0,5 G_n$. Так как в уравнение (355) вошел полный вес вала, то при определении G нужно величину $0,5 G_n$ вычесть, что и сделано в уравнении (367).

²⁾ ETZ, 1918, стр. 1, 15 и 25.

В обычных тихоходных машинах можно не считаться с критическим числом оборотов и выбирать $f_n = 0,1 \cdot \delta$.

На верху фиг. 91 изображен схематически вал, при чем стрелка прогиба для наглядности чертежа представлена в преувеличенном виде. Точка приложения силы G выбрана по середине ступицы ротора, так как влиянием веса контактных колец, весьма малого по сравнению с весом ротора, можно пренебречь. Расстояния a и b от точки приложения силы G до середин цапф определяются путем вычерчивания расположения отдельных частей машины и нанесения центров подшипников.

Изгибающий момент будет, таким образом, наибольшим в середине ступицы и равным для этого сечения

$$M_{b \max} = \frac{a \cdot b}{l} G \text{ cmkg}, \quad (371)$$

где l — расстояние между подшипниками¹⁾.

Величина нормального крутящего момента определяется выражением

$$M_{dn} = 102 \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P}{n} \cdot 10^2 \text{ cmkg}, \quad (372)$$

где P — мощность на валу машины в kW.

Для расчета вала решающую роль играет не нормальный крутящий момент, а максимальный, который, принимая во внимание возможность перегрузки машины, может быть принят равным

$$M_{d \max} \approx 2 M_{dn} \text{ cmkg}. \quad (373)$$

Тогда максимальный расчетный изгибающий момент определится выражением

$$M_{l \max} = 0,35 M_{b \max} + 0,65 \sqrt{M_{b \max}^2 + (\alpha_0 M_{d \max})^2} \text{ cmkg}, \quad (374)$$

где

$$\alpha_0 = \frac{k_b}{1,3 k_d} \approx 1.$$

Действующее на вал расчетное усилие будет тогда равно

$$G_l = M_{l \max} \frac{l}{a \cdot b} \text{ kg} \quad (375)$$

Стрелка прогиба вала для случая, представленного на фиг. 91, может быть выражена формулой

$$f_n = \frac{G_l \cdot a^3 \cdot b^3}{E \cdot J \cdot 3l} \text{ cm}, \quad (376)$$

где E — модуль упругости, который для литой стали равен

$$2,2 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2.$$

J — момент инерции поперечного сечения вала, равный:

для сплошного вала

$$J = \frac{\pi \cdot d_n^4}{64} \approx \frac{1}{20} d_n^4, \quad (377)$$

для полого вала

$$J = \frac{\pi (d_n^4 - d_{n1}^4)}{64} \approx \frac{1}{20} (d_n^4 - d_{n1}^4), \quad (378)$$

где d_n — внешний, а d_{n1} — внутренний диаметры вала.

¹⁾ Все длины мы будем измерять сантиметрами.

Подставляя значения для E и J в уравнение (376), найдем

для сплошного вала

$$d_n = \sqrt[4]{\frac{G_i \cdot a^2 \cdot b^2}{1,1 \cdot 10^8 \cdot l \cdot f_n}} \quad (379)$$

для полого вала

$$d_n^4 - d_{n1}^4 = \frac{G_i \cdot a^2 \cdot b^2}{1,1 \cdot 10^8 \cdot l \cdot f_n} \quad (380)$$

Полые валы применяются иногда для больших машин с целью уменьшения веса, увеличения охлаждения, для смазки, для прокладки проводов. Большей частью, однако, применяются сплошные валы из литой стали.

Найденный по уравнению (379) или (380) размер вала следует еще проверить на прочность по уравнению

$$k_b = \frac{M_i \max}{W} \quad (381)$$

где k_b — напряжение на изгиб (допускается для литой стали $k_b \leq 400 \div 500 \text{ kg/cm}^2$); W — момент сопротивления, равный

для сплошного вала

$$W = \frac{\pi d_n^3}{32} \approx 0,1 \cdot d_n^3 \quad (382)$$

для полого вала

$$W = \frac{\pi}{32} (d_n^3 - d_{n1}^3) \approx 0,1 (d_n^3 - d_{n1}^3) \quad (383)$$

Для небольших машин очень часто вал по всей его длине изготовляют с диаметром, определяемым уравнением (379), так как здесь стоимость обработки часто может оказаться большей, чем экономия в весе и материале. Для больших же машин вал выбирают с переменным сечением. Размеры вала в различных его сечениях определяют проще всего следующим методом, в основу которого положено условие, чтобы найденное по уравнению (381) напряжение k_b по всей длине вала сохраняло приблизительно постоянную величину или, другими словами, чтобы величина момента сопротивления

$$W = \frac{M_i}{k_b} \quad (384)$$

была во всех точках вала пропорциональна действующему в этом месте расчетному изгибающему моменту M_i .

Под схемой нашего вала, на фиг. 91, наносим в произвольном масштабе для различных расстояний от левого подшипника величины: $0,65 M_b$ (линия I) и $0,65 M_a$ (линия II). Далее при помощи построения, показанного на чертеже справа, производим геометрическое (под углом 90°) сложение этих величин и получаем кривую IV, дающую величины

$$0,65 \sqrt{M_b^2 + M_a^2 \max} \quad 1).$$

Теперь наносим на диаграмму линию III полных изгибающих моментов M_i . Складывая ординаты линии IV с разностями

$$BE = DE_1 = 0,35 M_b$$

между кривыми III и I, получаем кривую V расчетных изгибающих моментов M_i^2).

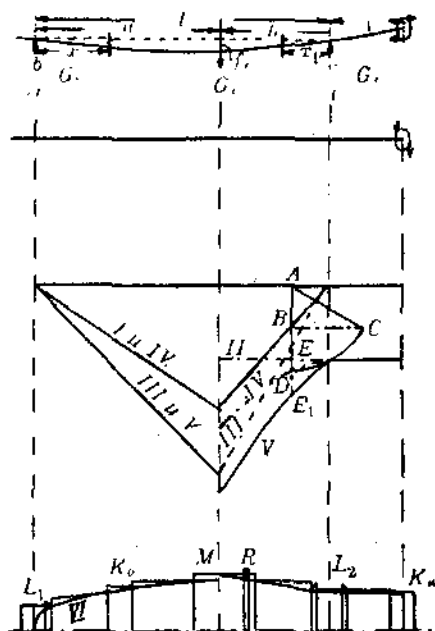
1) Так как слева от точки приложения силы G крутящий момент отсутствует, то линии I и IV здесь совпадают.

2) На левой стороне диаграммы линии III и V совпадут.

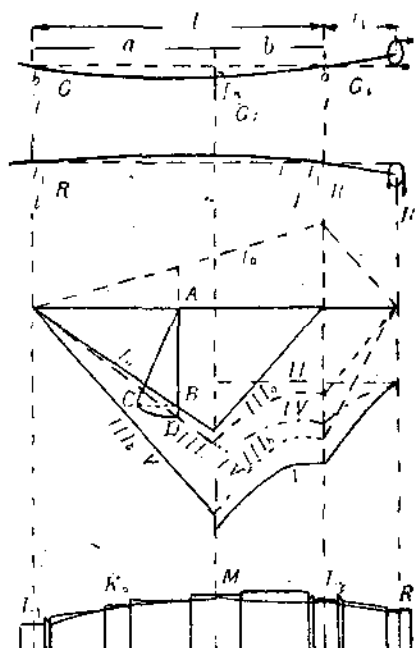
Найденные таким путем значения M , подставляются в уравнение (384), по полученным величинам W из уравнения (382) определяются d и наносятся в сильно преувеличенном масштабе на диаграмму (кривая VI).

Имея эту кривую, вычерчиваем профиль вала, принимая во внимание длину ступицы ротора (M), длину цапф (L_1 и L_2), длину контактных колец (K_0) и длину соединительной муфты (K_u), при чем везде действительный профиль вала должен лежать вне кривой VI.

При проектировании профиля вала не следует увлекаться чрезмерным разнообразием сечений для большого приближения к кривой VI, так как всякое изменение сечения, во-первых, удорожает обработку, а во-вторых, ослабляет прочность.



Фиг. 91.



Фиг. 92.

По возможности также следует стремиться к тому, чтобы поверхности вала везде были цилиндрическими, а не коническими, так как в последнем случае изготовление вала также удорожается. Для втулок ротора, колец и муфты нужно предусмотреть упоры, которые могут быть выточены вместе с валом (как показано на фиг. 91 для колец и для муфты) или же на валу выточивается канавка, в которую впоследствии закладывается кольцо (R на фиг. 91 для втулки ротора).

Если вал имеет большое разнообразие сечений, то стрелка прогиба не будет уже совпадать с подставленной нами в уравнении (379) величиной f_n , а по сравнению с ней несколько увеличится¹⁾ и будет равна

$$f_n = \frac{G_l}{E \cdot I} \left(b^2 \int_0^a \frac{x^2}{J} dx + a^2 \int_0^b \frac{x_1^2}{J} dx_1 \right) \text{ см} \dots \dots \dots (385)$$

Интегрирование проще всего произвести по частям для каждого участка с постоянным моментом инерции.

¹⁾ Это обстоятельство необходимо при профилированных валах предусматривать и в уравнение (379) подставлять несколько меньшие величины.

б) Расчет вала для моторов, имеющих ременный шкив или зубчатую передачу.

В этом случае, как показывает фиг. 92, мы будем иметь еще изгибающую силу R , направленную горизонтально (на фиг. 92 она показана вертикальной).

Если пренебречь весом шкива или зубчатки, то величину этой силы можно определить из формул:

в случае зубчатой передачи

$$R \approx 2 \frac{M_{d \max}}{d_s} \approx 4 \frac{M_{dn}}{d_s} \text{ кг}, \quad (386)$$

в случае ременного шкива

$$R \approx 3 \frac{M_{d \max}}{d_s} \approx 6 \frac{M_{dn}}{d_s} \text{ кг}, \quad (387)$$

где d_s — диаметр зубчатки или шкива.

Тогда результирующий изгибающий момент под серединой ступицы ротора

$$M_{br} = \sqrt{\left(\frac{ab}{l} G\right)^2 + \left(\frac{al_1}{l} R\right)^2} \text{ cmkg} \quad (388)$$

Максимальный расчетный изгибающий момент

$$M_{i \max} = 0,35 M_{br} + 0,65 \sqrt{M_{br}^2 + M_{d \max}^2} \text{ cmkg} \quad (389)$$

и расчетное усилие

$$G_i = \frac{l}{a \cdot b} \cdot M_{i \max} \text{ кг} \quad (390)$$

Дальнейший расчет ничем не отличается от рассмотренного в п. (а) и производится по тем же уравнениям. Несколько отличается лишь графический метод проектирования профилированного вала, который производится здесь, как показано на фиг. 92, и состоит в следующем.

Наносим на диаграмму в произвольном масштабе величины: $0,65 M_{br}$ (кривая Ia) — вертикального изгибающего момента и $0,65 M_{d \max}$ (кривая Ib) — горизонтального изгибающего момента. Складывая их геометрически (построение ABCD), получаем кривую IIIa, дающую величины $0,65 M_{br}$. Складывая эту кривую геометрически с кривой II крутящих моментов, получаем кривую IV, дающую величины

$$0,65 \sqrt{M_{br}^2 + M_{d \max}^2}.$$

Далее наносим кривую IIIb значений M_{br} и, сложив ее алгебраически с кривой IV, получаем кривую V расчетных изгибающих моментов M_i .

В остальном поступаем, как и в предыдущем случае.

Сила R , как видно из чертежа, дает некоторое уменьшение стрелки прогиба, но величина этого уменьшения обычно настолько ничтожна, что им можно пренебречь и считаться лишь со стрелкой прогиба, вызванной силой G_i .

с) Цапфы.

Диаметр цапфы d_s^* при профилированных валах определяется, как уже было показано в п. п. (а) и (б), с помощью графического построения, показанного на фиг. 91 и 92. Если же, как это часто бывает при расчете небольших машин, вал по всей своей длине имеет одинаковый диаметр, определяемый с помощью максимального расчетного изгибающего момента, то диаметры цапф определяются следующим образом.

Для случая машин с непосредственным сцеплением (фиг. 91) на правый подшипник действует только крутящий момент

$$\left. \begin{aligned} M_{d \max} &\approx 2 M_{dn} \approx \frac{2 \cdot 102 \cdot 30 \cdot 10^4}{\pi} \cdot \frac{P}{n} = 194600 \frac{P}{n} \text{ cmkg} \\ M_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (391)$$

Тогда расчетный изгибающий момент будет здесь равен

$$M_i = 0,35 M_b + 0,65 \sqrt{M_b^2 + M_{d \max}^2} = 0,65 M_{d \max} \text{ cmkg} \quad (392)$$

Так как

$$k_b = \frac{M_i}{W_{z1}} \text{ и } W_{z1} \approx 0,1 d_{z1}^3,$$

где W_{z1} — момент сопротивления правой цапфы,

d_{z1} — диаметр правой цапфы,

то

$$d_{z1} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_i}{k_b}} \text{ cm} \quad (393)$$

Для случая машин с ременным шкивом или зубчатой передачей (фиг. 92) на правый подшипник действуют

крутящий момент

$$\left. \begin{aligned} M_{d \max} &\approx 194 600 \frac{P}{n} \text{ cmkg} \\ \text{изгибающий момент} \quad M_b &= R \cdot l_1 \text{ cmkg} \end{aligned} \right\} \quad (394)$$

и расчетный изгибающий момент будет равен

$$M_i = 0,35 M_b + 0,65 \sqrt{M_b^2 + M_{d \max}^2} \text{ cmkg} \quad (395)$$

Определение диаметра цапфы и в этом случае производится по уравнению (393).

Определение длины цапфы производится с точки зрения правильного отвода теплоты. Для этого необходимо, чтобы

$$p_z v_z \leq 3 000, \quad (396)$$

где p_z — удельное давление на цапфу в kg/cm^2 ,

v_z — окружная скорость цапфы в $\text{cm/сек.} = \frac{\pi d_{z1} n}{60}$.

В случае машин с непосредственным сцеплением (фиг. 91) на правый подшипник действует сила

$$G_{z1} = \frac{a}{l} G_i \text{ kg} \quad (397)$$

и, следовательно,

$$p_{z1} = \frac{G_{z1}}{l_{z1} \cdot d_{z1}} \text{ kg/cm}^2 \quad (398)$$

Подставляя это выражение в уравнение (396), получим

$$\frac{G_{z1} \cdot v_{z1}}{l_{z1} \cdot d_{z1}} \leq 3 000 \text{ или } \frac{G_{z1} \cdot \pi d_{z1} n}{l_{z1} \cdot d_{z1} \cdot 60} \leq 3 000,$$

откуда

$$l_z \geq \frac{\pi \cdot G_{z1}}{180} \cdot \frac{n}{1 000} \text{ cm} \quad (399)$$

В случае машин с ременным шкивом или зубчатой передачей (фиг. 92) на правый подшипник действует сила

$$G_{z1} = \sqrt{\left(\frac{a}{l} G_i\right)^2 + \left(\frac{l+l_1}{l} R\right)^2} \text{ kg} \quad (400)$$

И в этом случае определение длины цапфы производится по уравнению (399).

Отметим, что получаемая по уравнению (398) величина p_{z1} должна быть

для обычных машин

$$p_{z1} \leq 6 \text{ kg/cm}^2,$$

для турбомоторов

$$p_{z1} \leq 2,5 \text{ kg/cm}^2.$$

Сила, действующая на левую цапфу (фиг. 91 и 92), составляет для машин с непосредственным сцеплением

$$G_{z2} = \frac{b}{l} G_1 \text{ кг}, \dots \dots \dots (401)$$

для машин с ременным шкивом или зубчатой передачей

$$G_{z2} = \sqrt{\left(\frac{b}{l} G_1\right)^2 + \left(\frac{l_1}{l} R\right)^2} \text{ кг} \dots \dots \dots (402)$$

Тогда диаметр этой цапфы, при равенстве $p_{z1} = p_{z2}$, можно определить из уравнения

$$d_{z2} = \sqrt[4]{\frac{5 \cdot G_{z2}^2}{k_b \cdot p_{z2}}} \text{ см}, \dots \dots \dots (403)$$

а длину—из уравнения

$$l_{z2} = d_{z2} \sqrt{\frac{0,2 \cdot k_b}{p_{z2}}} \text{ см}. \dots \dots \dots (404)$$

Как мы уже указывали выше, для цапф электрических машин обычно

$$\frac{l_z}{d_z} = 1,5 \div 4.$$

По „Нормам союза германских электротехников“ для цапф электрических машин стандартизованы следующие размеры.

d_z mm	l_z mm	d_z mm	l_z mm	d_z mm	l_z mm
10	30	30	80	70	170
12	35	32	85	75	180
14	40	35	90	80	200
16	45	38	95	85	210
18	50	42	105	90	220
20	55	45	110	95	230
22	60	55	130	100	250
25	65	60	140	110	275
28	75	65	160	120	300

3. Ременные шкивы и ремни.

В § 2 этой главы мы указывали [уравнение (372)], что вращающий момент мотора равен

$$M_{dn} = 102 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot 10^2 \cdot \frac{P}{n} \text{ смкг}.$$

Обозначая диаметр ременного шкива через d_s (см), находим окружное усилие, передаваемое ремнем

$$S = \frac{M_{dn}}{d_s} = 102 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot 10^2 \cdot \frac{P}{n \cdot d_s} = 1946 \cdot 10^2 \cdot \frac{P}{n \cdot d_s} \text{ кг} \dots \dots (405)$$

Расчет ремня следует вести по максимальному окружному усилию, которое можно положить равным

$$S_{\max} \approx 1,5 \cdot S \approx 3 \cdot 10^5 \cdot \frac{P}{n \cdot d_s} \text{ кг} \dots \dots \dots (406)$$

Таким образом, для определения $S_{\max}$ необходимо знать диаметр шкива. Этот диаметр можно определить из равенства

$$d_s = \frac{60 \cdot v_s}{\pi \cdot n} \cdot 100 \text{ см}, \dots \dots \dots (407)$$

где v_s — окружная скорость шкива, или, что то же, скорость движения ремня в m/sec .

Для электрических машин v_s лежит обычно в пределах от 15 до 40 m/sec . Расчет ремней нужно производить по допустимой нагрузке k на 1 cm ширины ремня. Для определения k может служить следующая таблица.

Диаметр ременного шкива d_s см	Скорость ремня v_s m/sec .						
	10	15	20	25	30	40	50
Для одинарных ремней							
10	3	3	3,5	3,5	3,5	3,5	3
20	5	5,5	6	6,5	6,5	6,5	6,5
30	6	7	7,5	8	8,5	9	9
40	7	8	9	9,5	10	10,5	11
50	8	9	10	10,5	11	11,5	12
60	9	10	11	12	12,5	13	13,5
75	10	11	12	12,5	13	13,5	14
100	11	12	13	13,5	14	14,5	15
150	12	13	13,5	14	14,5	15	15,5
200	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16
Для двойных ремней							
30	7	8	9	10	10	10	10
40	9	10	11	11,5	12	12,5	12,5
50	11	12	13	13	13,5	14	14
60	12	13	15	16	16	16,5	17
75	14	15,5	17,5	17,5	18,5	19,5	20
100	17	19	21	21	23	23	24
150	19	21	23	25	26	27	28
200	21	23	25	27	28	29	30

Толщину ремня нужно, по возможности, выбирать так, чтобы она была $\leq \frac{d_s}{100}$.
Определив таким образом ширину ремня, находим необходимую ширину шкива по таблице:

Ширина шкива b_s см	Ширина ремня b_r см	Ширина шкива b_s см	Ширина ремня b_r см	Ширина шкива b_s см	Ширина ремня b_r см
4	3	12	10	30	26
5	4	14	12	35	30
6	5	17	14	40	35
7	6	20	17	45	40
8,5	7	23	20	50	45
10	8,5	26	23	60	55

По „Нормам союза германских электротехников“ для электрических машин стандартизованы следующие размеры шкивов и ремней.

d_s mm	b_s mm	b_r mm	d_s mm	b_s mm	b_r mm	d_s mm	b_s mm	b_r mm
50	40	30	160	85	70	450	260	230
50	50	40	160	120	100	500	300	260
63	50	40	200	120	100	560	300	260
80	50	40	225	120	100	630	350	300
80	70	60	250	140	120	710	350	300
100	60	50	280	170	140	800	400	350
100	85	70	320	200	170	900	400	350
125	85	70	360	230	200	1 000	450	400
125	100	85	400	230	200	1 120	450	400

Данные относительно веса шкивов можно найти в каталогах соответствующих фирм, а также в справочнике Hütte.

4. Дополнительные расчеты для турбомоторов.

а) Ротор.

Благодаря наличию огромных линейных скоростей у роторов современных турбомоторов, материал, из которого сделан ротор, чрезвычайно сильно напряжен возникающими в нем центробежными силами. Действующая на сечение тела ротора центробежная сила будет равна

$$K_r = Q_r \cdot \frac{0,1 \cdot \gamma}{g} \cdot v_m^2 \text{ кг}, \dots \dots \dots (408)$$

где $Q_r = h_r \cdot l_0$ — сечение тела ротора;

γ — удельный вес материала ротора, равный для железа $7,8 \text{ кг/см}^3$;

g — ускорение силы тяжести $= 9,81 \text{ м/сек.}^2$;

v_m — линейная скорость центра тяжести сечения ротора, равная

$$v \frac{D - 2\delta - 2h_{a2} - h_r}{D} \text{ м/сек.}$$

Напряжение на разрыв, испытываемое ротором, будет составлять

$$k_z = \frac{K_r}{Q_r} = \frac{0,1 \cdot 7,8}{9,81} v_m^2 \approx 0,08 \cdot v_m^2 \text{ кг/см}^2, \dots \dots \dots (409)$$

т.е. оно будет зависеть исключительно от v_m^2 и, напр., при $v_m = 100 \text{ м/сек.}$ оно будет составлять 800 кг/см^2 . Максимальное напряжение на разрыв, которое можно допустить для роторов,

$$(k_z)_{\max} \leq 600 \div 700 \text{ кг/см}^2.$$

У нормальных, тихоходных машин величина v_m обычно составляет $10 \div 15 \text{ м/сек.}$, и напряжение k_z , таким образом, не превышает 20 кг/см^2 , вследствие чего проверять такие роторы на прочность не имеет смысла.

б) Зубцы ротора.

Сила, действующая на зубец ротора, складывается из центробежной силы масс зубца, меди одной впадины и клина $(G_1)_1$ и силы одностороннего магнитного притяжения зубца $(G_p)_1$.

Вес одного зубца ротора

$$(G_z)_1 = Z'_{\text{ср}} \cdot h_{z2} \cdot l_0 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \dots \dots \dots (410)$$

Вес обмотки одной впадины

$$(G_{\text{Cu}})_n = n_{z2} \cdot q_r \cdot l \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \dots \dots \dots (411)$$

Сила одностороннего магнитного притяжения зубца

$$(G_0)_1 = \left(\frac{B_1}{5000} \right)^2 \cdot Z'_{\text{max}} \cdot l_0 \text{ кг} \dots \dots \dots (412)$$

Вес клина $(G_k)_1$ подсчитывается по эскизу.

В уравнениях (410) — (412)

$Z'_{\text{ср}}$ — средняя ширина зубца в см,

h_{z2} — высота зубца в см,

l_0 — длина ротора без воздушных каналов в см,

$n_{z2} \cdot q_r$ — полное сечение меди в одной впадине в mm^2 ,

l — полная длина ротора,

Z'_{max} — максимальная ширина зубца в см.

Центробежная сила масс, действующая на зубец

$$(G_z)_1 = \frac{2 \cdot 10^3 [(G_z)_1 + (G_{\text{Cu}})_n + (G_k)_1] \cdot v_1^2}{g(D - 2\delta - h_{z2})} \text{ кг} \dots \dots \dots (413)$$

где v_1 — линейная скорость середины зубца, равная

$$v_1 = v \frac{D - 2\delta - h_{z2}}{D} \text{ м/сек} \dots \dots \dots (414)$$

g — ускорение силы тяжести = $9,81 \text{ м/сек}^2$.

Тогда полная сила, действующая на зубец, будет составлять

$$K_z = (G_z)_1 + (G_0)_1 \text{ кг} \dots \dots \dots (415)$$

и напряжение зубца на разрыв у его основания

$$k_z = \frac{K_z}{Z'_{\text{min}} \cdot l_0} \text{ кг/см}^2 \dots \dots \dots (416)$$

Величина максимального разрывного напряжения должна быть в этом случае

$$k_z \leq 600 \div 700 \text{ кг/см}^2.$$

с) Клинья ротора.

Клин ротора можно рассматривать как балку, свободно лежащую на опорах и равномерно нагруженную центробежной силой массы обмотки одной впадины $(G_z)_2$.

Сила

$$(G_z)_2 = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot (G_{\text{Cu}})_n \cdot v_2^2}{9,81(D - 2\delta - h_k')} \text{ кг} \dots \dots \dots (417)$$

где h_k' — высота клина в см,

v_2 — линейная скорость середины клина, равная

$$v_2 = v \frac{D - 2\delta - h_k'}{D} \text{ м/сек} \dots \dots \dots (418)$$

Полная сила, действующая на клин,

$$K_k = (G_z)_2 \text{ кг} \dots \dots \dots (419)$$

Максимальный изгибающий момент

$$M_b = K_k \cdot \frac{u_n'}{8} \text{ cmkg} \quad (420)$$

Момент сопротивления (для простоты принимаем, что сечение клина будет прямоугольником)

$$W = \frac{(h_k')^3 \cdot l}{6} \quad (421)$$

Тогда напряжение на изгиб будет равно

$$k_b = \frac{M_b}{W} \text{ kg/cm}^2 \quad (422)$$

Максимальное напряжение на изгиб должно быть

для деревянных клиньев

$$k_b \leq 65 \text{ kg/cm}^2,$$

для фибровых клиньев

$$k_b \leq 80 \text{ kg/cm}^2,$$

для железных клиньев

$$k_b \leq 400 \text{ kg/cm}^2.$$

Г Л А В А X.

Расчет пусковых приспособлений.

1. Пусковые приспособления для трехфазных двигателей.

а) Пусковой трансформатор в цепи статора.

Статорные трансформаторы применяются обычно для пуска в ход двигателей средней и большой мощности с короткозамкнутым ротором. Схема такого устройства изображена на фиг. 93. Трансформатор представляет собой обычно автотрансформатор с одной катушкой на фазу. При пуске переключатель u ставится в верхнее положение и при достижении нормального числа оборотов переводится вниз.

Фазовое напряжение на моторе при пуске будет

$$E_M = \frac{E_1}{u}, \quad (423)$$

где u — передаточное число трансформатора, т.-е. отношение полного числа витков одной фазы к числу витков, заключающемуся между зажимом двигателя и точкой ответвления.

Ток сети при этом будет составлять $\frac{1}{u}$ часть статорного тока. Если пренебречь падением напряжения в пусковом трансформаторе, так как его кажущееся сопротивление мало по сравнению с кажущимся сопротивлением короткого замыкания мотора, то пусковой ток

$$I_z = \frac{1}{u} \cdot \frac{E_M}{z_k} = \frac{E_1}{u^2 \cdot z_k} = \frac{I_k}{u^2} \quad (424)$$

Обозначим через a отношение пускового тока I_z к нормальному току полной нагрузки I_1 , т.-е.

$$I_z = a \cdot I_1 = \frac{I_k}{u^2}, \quad (425)$$

тогда

$$u^2 = \frac{I_k}{a \cdot I_1} \quad (426)$$

Для моторов средней и большой мощности a лежит в пределах от 1 до 2, при чем, как видно из уравнения (426), при заданном a величина u тем больше, чем больше ток короткого замыкания.

Как известно из теории асинхронных двигателей ¹⁾, вращающий момент в синхронных ваттах (мощность вращающегося потока)

$$P_{\Phi} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot \frac{r_2}{s}, \dots (427)$$

где s — скольжение.

При пуске, т.е. при $s = 1$,

$$P_{\Phi (s=1)} = m_2 \cdot I_{2A}^2 \cdot r_2, \dots (428)$$

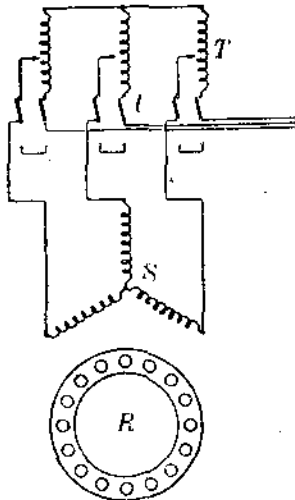
т.е. равно омической потере в обмотке ротора, при чем I_{2A} будет ток ротора при пуске.

Так как при пусковом токе I_x ток статора будет

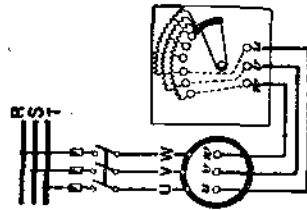
$$I_{1A} \approx u I_x = u a I_1, \dots (429)$$

то и роторный ток при пуске также будет приблизительно

$$I_{2A} = u a I_2 \dots (430)$$



Фиг. 93.



Фиг. 94.

и, согласно уравнению 427, момент в синхронных ваттах при пуске будет в $(ua)^2$ раз больше, чем омическая потеря при полной нагрузке

$$m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2.$$

Так как

$$\frac{m_2 \cdot I_2^2 \cdot r_2}{P_{\Phi}} = s, \dots (431)$$

то отношение пускового вращающего момента к нормальному будет

$$\frac{M_A}{M_N} = \frac{P_{\Phi (s=1)}}{P_{\Phi}} = (ua)^2 s \dots (432)$$

или, принимая во внимание уравнение (426),

$$\frac{M_A}{M_N} = a \cdot \frac{I_k}{I_1} \cdot s \dots (433)$$

Так как отношение $\frac{M_A}{M_N}$ в лучшем случае может достигнуть значения 0,4 — 0,5, т.е. в лучшем случае пусковой момент составляет 40 — 50% нормального момента, то такие моторы можно пускать лишь без нагрузки (вхолостую).

При расчете пускового трансформатора задаются величиной a и, зная I_1 и I_k , по уравнению (426) определяют коэффициент трансформации u . Найдя из диаграммы скольжение s , соответствующее нормальному току I_1 , мы можем определить по уравнению (433) отношение $\frac{M_A}{M_N}$.

¹⁾ См., напр., Arnold.— Wechselstromtechnik, т. V, 1, стр. 30.

б) Пусковой реостат в цепи ротора.

Понижение пускового тока путем включения сопротивлений в цепь ротора является наиболее распространенным методом пуска для двигателей, имеющих ротор с кольцами. Схема соединений для этого метода изображена на фиг. 94.

Пусковой реостат нужно рассчитывать так, чтобы была возможность пускать двигатель при полной нагрузке или даже с некоторой перегрузкой, т.е. начальный вращающий момент должен быть

$$M_A \geq M_N \quad (434)$$

В связи с этим и пусковой ток должен быть

$$I_{1A} \geq I_1 \quad (435)$$

Для двигателей, которые пускаются часто и останавливаются на небольшие промежутки времени, отношение

$$q = \frac{I_{1A}}{I_1} \quad (436)$$

выбирают обычно равным $1 \div 1,5$. Для двигателей, пускаемых редко, часто берут $q = 1,5 - 2,2$. Для обычных моторов среднего типа, характер работы которых в будущем неизвестен, берут

$$q = 1,2 \div 1,7.$$

При расчете ступеней реостата нужно обращать внимание на то, чтобы колебания тока не были слишком велики. Обычно сопротивления выбирают так, чтобы толчки тока при переходе с одной ступени на другую были одинаковы, т.е. чтобы сила тока изменялась между некоторыми максимальным и минимальным значениями, при чем обычно

$$\begin{aligned} I'_{\max} &= I_{1A}, \\ I'_{\min} &= I_1. \end{aligned}$$

Введем обозначения

$R_0, R_1, R_2 \dots$ — полные сопротивления одной фазы роторной цепи (включая и сопротивление роторной обмотки) на первой, второй, третьей... ступени;

$\rho_1, \rho_2, \rho_3 \dots$ — сопротивления отдельных ступеней реостата.

Если ток статора должен колебаться между значениями $I'_{\max}$ и $I'_{\min}$, то и ток ротора должен колебаться между значениями $I''_{\max}$ и $I''_{\min}$. Эти токи получаются, однако, на разных ступенях, при различных скольжениях, которые относятся между собой при одном и том же токе как полные сопротивления ротора, т.е.

$$\frac{R}{s} = \text{const.} \quad (437)$$

Таким образом, если роторный ток $I''_{\max}$ имеет место,

на первой ступени с полным сопротивлением $R_0 \dots$ при скольжении $s = 1$

» второй	»	»	»	$R_1 \dots$	»	»	s_1
» третьей	»	»	»	$R_2 \dots$	»	»	s_2
» x-ой	»	»	»	R_{x-1}	»	»	s_{x-1}

то

$$I''_{\max} \cdot \frac{R_0}{1} = I''_{\max} \cdot \frac{R_1}{s_1} = I''_{\max} \cdot \frac{R_2}{s_2} = I''_{\max} \cdot \frac{R_{x-1}}{s_{x-1}},$$

т.е.

$$\frac{R_0}{1} = \frac{R_1}{s_1} = \frac{R_2}{s_2} = \frac{R_{x-1}}{s_{x-1}} \quad (438)$$

Когда на первой ступени ток упадет до величины $I''_{\min}$, ее сопротивление выключается, и ток снова возрастает до $I''_{\max}$. Так как скорость в момент выключения ступени не изменяется, то на второй ступени при токе $I''_{\max}$ скорость будет та же, что и на первой, при токе $I''_{\min}$. Таким образом, двигатель идет при токе $I''_{\max}$ со скольжением s_1 , а затем на той же ступени при токе $I''_{\min}$ со скольжением s_2 и т. д.

Поэтому

$$I''_{\min} \cdot \frac{R_0}{s_1} = I''_{\min} \cdot \frac{R_1}{s_2} = I''_{\min} \cdot \frac{R_2}{s_3} = I''_{\min} \cdot \frac{R_{x-1}}{s_x} \quad \text{или} \quad \frac{R_0}{s_1} = \frac{R_1}{s_2} = \frac{R_2}{s_3} = \frac{R_{x-1}}{s_x} \quad (439)$$

Из уравнений (438) и (439) получаем

$$s_2 = s_1^2; \quad s_3 = s_1 s_2 = s_1^3; \quad s_x = s_1 s_{x-1} = s_1^x.$$

Таким образом скольжения, имеющие место на отдельных ступенях, образуют геометрическую прогрессию.

Полные сопротивления отдельных ступеней

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= R_0 \\ R_1 &= R_0 s_1 \\ R_2 &= R_1 s_1 = R_0 s_1^2 \\ R_3 &= R_2 s_1 = R_0 s_1^3 \\ R_x &= R_{x-1} s_1 = R_0 s_1^x \end{aligned} \right\} \quad (440)$$

Сопротивления отдельных ступеней

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= R_0 - R_1 = R_0 (1 - s_1) = \rho_1 \\ \rho_2 &= R_1 - R_2 = R_0 (s_1 - s_1^2) = \rho_1 s_1 \\ \rho_3 &= R_2 - R_3 = R_0 (s_1^2 - s_1^3) = \rho_1 s_1^2 \\ \rho_x &= R_{x-1} - R_x = R_0 (s_1^{x-1} - s_1^x) = \rho_1 s_1^{x-1} \end{aligned} \right\} \quad (441)$$

Таким образом, для того чтобы найти сопротивления всех ступеней, нужно знать полное сопротивление R_0 и скольжение s на первой ступени.

При выключении x -ой ступени, в цепи ротора остается лишь сопротивление самой роторной обмотки r_2 . Для того чтобы ток при этом достиг величины $I'_{\max}$, двигатель должен иметь скорость, соответствующую току $I'_{\max}$ и короткозамкнутому ротору, т.е. скольжение $s_{\max}$, которое определится из диаграммы для тока $I'_{\max}$.

Мы имеем

$$s_x = s_1^x = s_{\max} \quad \text{или} \quad s_1 = \sqrt[x]{s_{\max}}, \quad (442)$$

где x — число ступеней реостата.

Полное сопротивление

$$R_0 = \frac{r_2}{s_{\max}} \quad (443)$$

Скольжением s_1 на первой ступени устанавливается величина отношения $I'_{\max} : I'_{\min}$, при чем ток $I'_{\max}$ определяется скольжением $s_{\max}$. Таким образом току $I'_{\min}$ соответствует на диаграмме скольжение $s_1 \cdot s_{\max}$. Если токи $I'_{\max}$ и $I'_{\min}$ лежат вблизи нормального тока, то можно принять, что скольжение пропорционально току, т.е.

$$I'_{\min} \approx s_1 \cdot I'_{\max} \quad \text{или} \quad s_{\min} = s_1 \cdot s_{\max} \quad (444)$$

При расчете задаются током $I'_{\max}$, определяют по диаграмме для токов $I'_{\max}$ и $I'_{\min}$ (равного I_1) скольжения $s_{\max}$ и $s_{\min}$, определяют по уравнению (444) скольжение на первой ступени s_1 и, пользуясь уравнением (442), находят число ступеней x .

Полученное значение округляют до ближайшего целого числа и окончательно устанавливают s_1 [снова по уравнению (442)], $s_{\min}$ (по уравнению 444) и $I_{\min}$ (по диаграмме).

Далее, по уравнению (443) определяют R_0 и по уравнению (441) — отдельные сопротивления $R_1, R_2, R_3 \dots$

Если двигатель пускается не при полной нагрузке, то вследствие значительного толчка тока на первой ступени мотор может сильно „рвануть“. Во избежание этого следует перед первой ступенью устраивать еще добавочные сопротивления такой величины, чтобы при постановке ручки реостата на первый контакт двигатель брал лишь ток

$$\frac{1}{k} \cdot I'_{\max}$$

Для двигателей различной мощности значения k и наименьшего числа добавочных ступеней приведены в следующей таблице.

Мощность двигателя P в kW =	1	10	20	50	100	500
$k \geq$	1	1	2	3	4	5
Наим. число добавочн. ступен. $y \geq$	0	0	1	2	3	4

Если по диаграмме току $\frac{1}{k} \cdot I'_{\max}$ соответствует скольжение s_y , то, на основании уравнения (443), полное сопротивление одной фазы

$$R_y = \frac{r_s}{s_y}, \dots \dots \dots (445)$$

и на долю добавочных ступеней придется сопротивление

$$R_d = R_y - R_0 \dots \dots \dots (446)$$

Отдельные ступени добавочного сопротивления должны быть рассчитаны так, чтобы сила тока возрастала равномерно.

2. Пусковые приспособления для однофазных двигателей.

Так как начальный вращающий момент однофазного асинхронного двигателя равен нулю, то для пуска в ход здесь приходится прибегать к дополнительной обмотке статора, создающей вместе с главной обмоткой и добавочными индуктивными и омическими сопротивлениями вращающееся поле. Чтобы ограничить пусковой ток, который достигает здесь обычно величины

$$I_{1\lambda} = (1 \div 1,35) I_1 \dots \dots \dots (447)$$

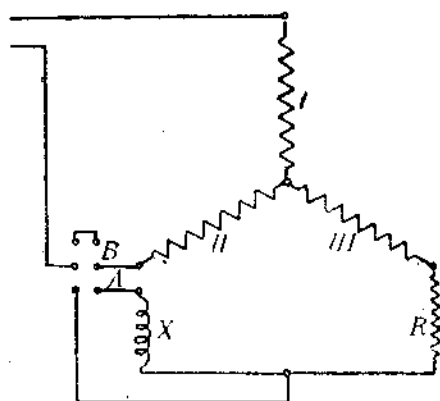
в цепь ротора (обычно трехфазного) включают сопротивление, величину которого на фазу обозначим через R_0 .

В качестве дополнительной обмотки статора берут третью, неиспользуемую при нормальной работе, фазу статора. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать статорную обмотку, как состоящую из трех фаз, имеющих каждая омическое сопротивление $\frac{r_1}{2}$ и индуктивное сопротивление $\frac{x_1}{2}$.

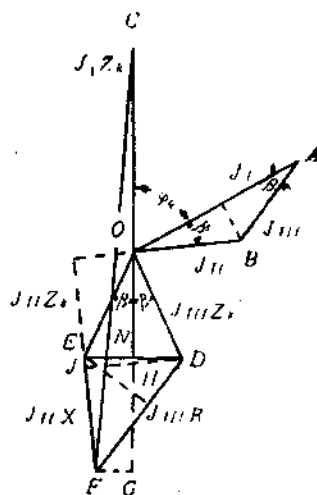
Одна из типичных пусковых схем (схема Hansen'a) для статора однофазного двигателя представлена на фиг. 95. Здесь три фазы статора соединены в звезду, и перед фазой II включается дроссельная катушка X , а перед фазой III — сопротивление R . При верхнем положении двухполюсного переключателя (B) фаза III выключена (рабочее положение); при нижнем положении (A) производится пуск в ход. При пуске фаза I обтекается током I_I , равным полному току сети; в фазе II ток I_{II} отстает от I_I , а в фазе III ток I_{III} опережает I_I . Наилучшее действие достигается в том случае, когда угол отставания I_{II} и угол опережения I_{III} равны между собой. При этом мы получаем треугольник токов OAB (фиг. 96), где

$$OA = I_I; \quad OB = I_{II}; \quad BA = I_{III}$$

$$I_{II} = I_{III} = \frac{I_I}{2 \cdot \cos \beta} \quad (448)$$



Фиг. 95.



Фиг. 96.

Обозначим через Z_k кажущееся сопротивление короткого замыкания одной фазы статора¹⁾, φ_k — соответствующий угол сдвига и на фиг. 96 отложим вектор $OC = I_I \cdot Z_k$, опережающий ток I_I на угол φ_k .

Нанесем, кроме того, векторы:

опережающий OC на угол β , $DO = I_{III} \cdot Z_k$,

отстающий от OC на угол β , $EO = I_{II} \cdot Z_k$.

Из чертежа следует, что

$$DO = EO = \frac{OC}{2 \cos \beta} \quad (449)$$

Если провести параллель DF к I_{III} и перпендикуляр EF к I_{II} , пересекающиеся в точке F , то

$DF = I_{III} \cdot R$ — напряжение на сопротивлении R ,

$EF = I_{II} \cdot X$ — напряжение на катушке X .

¹⁾ Это сопротивление не равно $\frac{Z_k}{2}$, так как в него входит, помимо сопротивления роторной обмотки, еще и добавочное сопротивление ротора R_R .

Как известно из теории, начальный вращающий момент двигателя с трехфазной обмоткой, фазы которой образуют углы β , β и $180 - 2\beta$, выраженный в синхронных ваттах

$$P_A = \sqrt{3} \cdot (I_2')^2 \cdot r_2' \cdot \operatorname{tg} \beta \dots \dots \dots (450)$$

Для обычного трехфазного двигателя $\beta = 60^\circ$,

$$I_{II} = I_{III} = I_I$$

и

$$P_A = 3 (I_2')^2 \cdot r_2',$$

т.-е. мы получили уже знакомое нам уравнение (428).

Для нашего случая наивыгоднейшее значение для β лежит около 30° , т.-е.

$$P_A = \sqrt{3} (I_2')^2 r_2' \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} = (I_2')^2 r_2' \dots \dots \dots (451)$$

Мы видим, что для однофазного двигателя при тех же I_2' и r_2' начальный момент составляет лишь $\frac{1}{3}$ момента трехфазного двигателя.

Полное напряжение сети относится к напряжению фазы I, как (фиг. 96) $FC:OC$.

Так как пусковой ток

$$I_{IA} = I_I,$$

то мы можем выразить напряжение на зажимах E_1 через I_I и Z_k и полное сопротивление всей цепи, изображенной на фиг. 95, через Z_k и β .

Опустим перпендикуляр DJ на EF . Тогда

$$DJ = DF \cdot \sin (DFE) = DE \cdot \sin (DEF)$$

или

$$I_{III} \cdot R \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\beta \right) = I_I \cdot Z_k \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin (\varphi_k + \beta),$$

или так как

$$I_{III} = \frac{I_I}{2 \cos \beta},$$

то

$$R = 2Z_k \frac{\sin (\varphi_k + \beta)}{\cos 2\beta} \cdot \sin \beta \dots \dots \dots (452)$$

Опустив перпендикуляр EH на DF , найдем, что

$$EH = EF \cdot \sin (DFE) = DE \sin (FDE)$$

или

$$I_{II} \cdot X \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\beta \right) = I_I \cdot Z_k \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin \left[\frac{\pi}{2} - (\varphi_k - \beta) \right],$$

и так как

$$I_{II} = \frac{I_I}{2 \cos \beta},$$

то

$$X = 2Z_k \frac{\cos (\varphi_k - \beta)}{\cos 2\beta} \cdot \sin \beta \dots \dots \dots (453)$$

Напряжение

$$E_1 = CF = \sqrt{(CG)^2 + (GF)^2}.$$

Здесь

$$\begin{aligned} CG &= CN + NG = \frac{3}{2} I_1 \cdot Z_k + I_{II} X \cdot \sin(DEF) = \\ &= I_1 \cdot \frac{Z_k}{2} \left[3 + \frac{2 \cos(\varphi_k - \beta) \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin(\varphi_k + \beta)}{\cos 2\beta} \right] = \\ &= I_1 \cdot \frac{Z_k}{2} \left[3 + \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos 2\beta} (\sin 2\beta + \sin 2\varphi_k) \right], \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned} GF &= NE - EF \cos(DEF) = \frac{1}{2} I_1 \cdot Z_k \cdot \operatorname{tg} \beta - I_{II} \cdot X \cdot \cos(\varphi_k + \beta) = \\ &= \frac{1}{2} I_1 \cdot Z_k \left[\operatorname{tg} \beta - \frac{2 \operatorname{tg} \beta \cdot \cos(\varphi_k - \beta) \cdot \cos(\varphi_k + \beta)}{\cos 2\beta} \right] = \\ &= \frac{1}{2} I_1 \cdot Z_k \cdot \operatorname{tg} \beta \frac{\cos 2\varphi_k}{\cos 2\beta}. \end{aligned}$$

Таким образом

$$E_1 = I_1 \frac{Z_k}{2} \sqrt{\left[3 + \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos 2\beta} (\sin 2\beta + \sin 2\varphi_k) \right]^2 + \left[\frac{\operatorname{tg} \beta \cdot \cos 2\varphi_k}{\cos 2\beta} \right]^2} = I_1 \cdot Z \quad \dots (454)$$

где Z — полное сопротивление фиг. 95.

Так как

$$Z = \frac{E_1}{I_{1A}} = \frac{E_1}{I_1}, \quad \dots (455)$$

то из уравнений (454) и (455) легко определить

$$Z_k = \frac{2Z}{\sqrt{\left[3 + \frac{\operatorname{tg} \beta}{\cos 2\beta} (\sin 2\beta + \sin 2\varphi_k) \right]^2 + \left[\frac{\operatorname{tg} \beta \cdot \cos 2\varphi_k}{\cos 2\beta} \right]^2}} \quad \dots (456)$$

Так как величина φ_k неизвестна¹⁾, то ею нужно задаться.

Обычно угол

$$\varphi_k \approx 20^\circ.$$

Чтобы определить сопротивление ротора и проконтролировать принятое нами значение φ_k , строим диаграмму Ossappa-Simes'a (фиг. 97), как для трехфазного двигателя, по данным:

$$I_k = \frac{E_1}{z_k}$$

$\cos \varphi_k$ [определяемому по уравнению (165)],

$$I_0 = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{02}^2},$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{02}}{I_{\mu}},$$

т.е. по току короткого замыкания и намагничивающему току.

На этой диаграмме, как указано в гл. VI, 3, определяем точки B_1 , B_k и B_{∞} .

На эту диаграмму наносим ток короткого замыкания, равный²⁾

$$OB = \frac{E_1}{2 \cdot Z_k} \quad \dots (457)$$

¹⁾ Здесь φ_k , соответствующее Z_k , конечно, имеет совершенно другое значение, чем φ_k , соответствующее сопротивлению z_k [уравнение (165)].

²⁾ Так как диаграмма начерчена для всей статорной обмотки, а величина Z_k [уравнение (456)] определена нами для одной фазы, то в уравнение (457) подставлено двойное значение Z_k .

Тогда общее сопротивление одной фазы ротора определится из соотношения

$$\frac{Av}{rv} = \frac{R_o' + r_2'}{r_2'} = \frac{R_o + r_2}{r_2} = a, \quad (458)$$

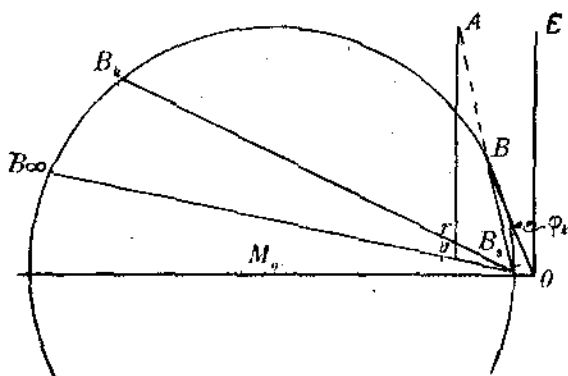
откуда добавочное сопротивление ротора

$$R_o = r_2 (a - 1) \quad (459)$$

Измерив на диаграмме угол

$$\varphi_k = BOE,$$

подставляем его в уравнение (456) и проверяем, насколько совпадает полученное значение Z_k с ранее найденным. При значительном несовпадении повторяем расчет снова, приняв предварительно другую величину φ_k .



Фиг. 97.

Определив

$$I_2' \approx 0,95 \cdot I_1, \quad (460)$$

находим по уравнению (451) пусковой момент в синхронных ваттах P_A и определяем его отношение к нормальному моменту при полной нагрузке P .

Наконец, по уравнениям (452) и (453) определяем значения R и X .

Г Л А В А XI.

Примеры расчета асинхронных двигателей.

1. Трехфазный двигатель, $P = 100 \text{ kW}$, $E = 3000 \text{ V}$, $n_s = 1000 \text{ об./мин.}$

Пусковой реостат.

Двигатель открытого типа и предназначен для непосредственного соединения с рабочей машиной.

Обмотку ротора возьмем с кольцами. Фазы статора и ротора соединены в звезду. Следовательно

число фаз статора

$$m_1 = 3,$$

число фаз ротора

$$m_2 = 3,$$

напряжение одной фазы статора

$$E_1 = \frac{E}{\sqrt{3}} = \frac{3000}{\sqrt{3}} = 1730 \text{ V.}$$

Пользуясь данными гл. I, устанавливаем следующие величины:

число пар полюсов

$$p = \frac{3000}{n_s} = \frac{3000}{1000} = 3,$$

коэффициент полезного действия

$$\eta = 0,915,$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi = 0,89.$$

Так как, согласно гл. I, 2, нормальным числом оборотов для нашего двигателя является $n_s = 750$, то приведенная мощность будет составлять

$$100 \frac{750}{1000} = 75 \text{ kW}.$$

Этому значению соответствуют:

линейная нагрузка

$$AS = 290,$$

индукция в воздушном промежутке

$$B_l = 6850,$$

подводимая к двигателю мощность

$$P_s = \frac{P}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{100}{0,915 \cdot 0,89} = 122,7 \text{ kVA},$$

сила тока одной фазы

$$I_1 = \frac{P_s}{m_1 \cdot E_1} \cdot 10^3 = \frac{122,7 \cdot 10^3}{3 \cdot 1730} = 23,6 \text{ A},$$

коэффициент использования

$$C = 1,161 \cdot AS \cdot B_l \cdot 10^{-12} = 1,161 \cdot 290 \cdot 6850 \cdot 10^{-12} = 23,1 \cdot 10^{-7}.$$

Тогда

$$D^2 \cdot l_1 = \frac{P_s}{C \cdot n_s \cdot f_1} = \frac{122,7 \cdot 10^3}{23,1 \cdot 1000 \cdot 0,96} = 55300.$$

Выбирая

$$\lambda = \frac{l_1}{D} = 0,5,$$

по кривым фиг. 3 найдем

$$D = 48 \text{ cm}, \quad l_1 = 24 \text{ cm},$$

откуда

$$D^2 l_1 = 48^2 \cdot 24 = 55300,$$

что абсолютно точно совпадает с ранее найденным числом.

При этом линейная скорость

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n_s}{60} \cdot 10^{-2} = \frac{\pi \cdot 48 \cdot 1000 \cdot 10^{-2}}{60} = 25,1 \text{ m/сек.}$$

лежит в нормальных пределах.

Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 48}{6} = 25,1 \text{ cm}.$$

Величина воздушного промежутка по уравнению (53)

$$\delta = 0,02 \left(1 + \frac{\sqrt{0,5 \cdot D \cdot I_1}}{10} \right) = 0,02 \left(1 + \frac{\sqrt{0,5 \cdot 48 \cdot 24}}{10} \right) \approx 0,07 \text{ см.}$$

По ГОСТ 679 а также по „Нормам союза германских электротехников“ для проектируемого двигателя должно быть

$$\delta = 0,08 \text{ см.}$$

На этой последней величине мы и остановимся.

Диаметр ротора

$$D' = D - 2\delta = 48 - 2 \cdot 0,08 = 47,84 \text{ см.}$$

В статоре и роторе сделаем по три охлаждающих канала, длиной по 1 см каждый, т.-е.

$$b = 3 \text{ и } L = 1.$$

Тогда полная длина сердечника

$$\begin{aligned} l &= l_1 + bL - 1,46(b+1) \cdot \delta \cdot \lg \left(1 + \frac{\pi \cdot L}{2\delta} \right) = \\ &= 24 + 3 \cdot 1 - 1,46(3+1) \cdot 0,08 \cdot \lg \left(1 + \frac{\pi \cdot 1}{2 \cdot 0,08} \right) = 26,34 \text{ см.} \end{aligned}$$

Примем окончательно $l = 26 \text{ см.}$ Тогда

$$\begin{aligned} l_1 &= l - bL + 1,46(b+1) \cdot \delta \cdot \lg \left(1 + \frac{\pi \cdot L}{2\delta} \right) = \\ &= 26 - 3 \cdot 1 + 1,46(3+1) \cdot 0,08 \cdot \lg \left(1 + \frac{\pi \cdot 1}{2 \cdot 0,08} \right) = 23,66 \text{ см.} \end{aligned}$$

Число витков одной фазы статора

$$w_1 = \frac{\pi D \cdot AS}{2 \cdot m_1 \cdot I_1} = \frac{\pi \cdot 48 \cdot 290}{2 \cdot 3 \cdot 23,6} \approx 308.$$

Число впадин на полюс и фазу берем

$$q_1 = 4.$$

По уравнению (61)

$$q_1 \approx (0,5 \div 0,25) \frac{\tau}{m_1} = (0,5 \div 0,25) \frac{25,1}{3} = 4,2 \div 2,1.$$

Проверяем объем тока

$$A_n = \frac{\alpha \cdot \tau \cdot AS}{m_1 \cdot q_1} = \frac{1 \cdot 25,1 \cdot 290}{3 \cdot 4} = 607,$$

что вполне допустимо.

Число проводников на впадину

$$n_{*1} = \frac{w_1}{p \cdot q_1} = \frac{308}{3 \cdot 4} = 25,7.$$

Берем

$$n_{*1} = 25,$$

тогда

$$w_1 = 25 \cdot 3 \cdot 4 = 300$$

и

$$AS = \frac{2w_1 \cdot m_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 300 \cdot 3 \cdot 23,6}{\pi \cdot 48} = 282,$$

т.-е. почти равно принятому нами ранее $AS = 290$.

Полное число впадин статора

$$u_1 = 2 \cdot m_1 \cdot p \cdot q_1 = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 = 72.$$

Обмотку устраиваем катушечную, с витыми соединениями по схеме фиг. 10. Схема обмотки показана на фиг. 98.

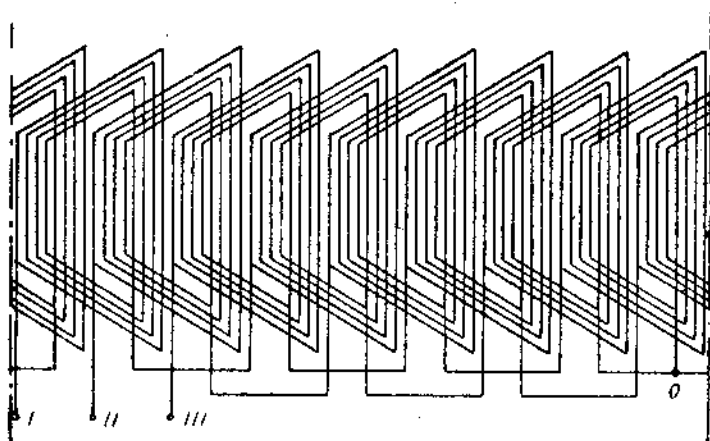
Сечение проводника берем равным по германским нормам:

$$q_s = 4,909 \text{ мм}^2.$$

При этом плотность тока

$$\Delta_1 = \frac{I_1}{q_s} = \frac{23,6}{4,909} = 4,8 \text{ А/мм}^2,$$

что вполне соответствует данным гл. I.



Фиг. 98.

Проводник берем круглый. Диаметр голого проводника

$$d = 2,5 \text{ мм}.$$

Диаметр изолированного проводника (изоляция *ВВ* по германским нормам)

$$d_1 = 2,5 + 0,26 = 2,76 \text{ мм}.$$

Толщину миканитовой изоляции впадин берем согласно гл. II, 3 равной 2 мм.

Расположение проводников и размеры впадины представлены на фиг. 99.

Высота впадины

$$h_{n1} = 9 \cdot 2,76 + 2 \cdot 2 + 0,5 \approx 29,4 \text{ мм}.$$

Ширина впадины

$$b_{n1} = 2,76 + 2 \cdot 2,76 \sin 60 + 2 \cdot 2 + 0,3 \approx 11,9 \text{ мм}$$

(здесь 0,3 мм — запас для облегчения вкладывания обмотки).

Отношение

$$\frac{h_{n1}}{b_{n1}} = \frac{29,4}{11,9} = 2,47 < 4.$$

Высота впадины по уравнению (73) должна лежать в пределах

$$h_{n1} = (4 \div 5) \frac{D-9}{D-4} = (4 \div 5) \frac{48-9}{48-4} = 3,35 \div 4,2 \text{ см},$$

что лишь немного отличается от принятого нами размера.

Зубцовый шаг на поверхности статора

$$t'_{\min} = \frac{\pi \cdot D}{u_1} = \frac{\pi \cdot 48}{72} = 2,09 \text{ см.}$$

Наименьшая ширина зубца

$$Z'_{\min} = t'_{\min} - b_{n1} = 2,09 - 1,19 = 0,9 \text{ см.}$$

Максимальная индукция

$$B'_{\max} = \frac{t'_2 \cdot l_1 \cdot B_2}{Z'_{\min} (l - bL) \cdot 0,9} = \frac{2,09 \cdot 23,66 \cdot 6850}{0,9 (26 - 3 \cdot 1) \cdot 0,9} = 18200,$$

что вполне допустимо.

В роторе возьмем число впадин на полюс и фазу

$$q_2 = 5.$$

Выберем стержневую двухслойную обмотку с удлинением перехода. Тогда

$$n_{u2} = 2$$

и число витков роторной обмотки

$$w_2 = n_{u2} \cdot p \cdot q_2 = 2 \cdot 3 \cdot 5 = 30.$$

Максимальное напряжение между кольцами

$$E_{r\max} \approx E \frac{w_2}{w_1} = 3000 \frac{30}{300} = 300 \text{ В,}$$

что вполне допустимо.

Так как, согласно гл. II, 2, А, I, обмоточные коэффициенты

$$f_1 = 0,958 \text{ и } f_2 = 0,957,$$

то сила тока в роторе

$$I_2 = 0,9 I_1 \frac{f_1 \cdot w_1 \cdot m_1}{f_2 \cdot w_2 \cdot m_2} = 0,9 \cdot 23,6 \frac{0,958 \cdot 300 \cdot 3}{0,957 \cdot 30 \cdot 3} = 212 \text{ А.}$$

Сечение роторного проводника возьмем

$$q_r = 7 \times 7 = 49 \text{ мм}^2.$$

Тогда, согласно уравнению (50), обмотка будет характеризоваться следующими данными

$$y_1 = 3q_2 = 3 \cdot 5 = 15,$$

$$y_2 = 3q_2 \text{ до } 3q_2 + 1 = 3 \cdot 5 \text{ до } 3 \cdot 5 + 1 = 15 \text{ до } 16.$$

$$\text{Шаг} \dots \dots \dots 1_n \overset{3}{-} 16_n \overset{n}{-} 31_n$$

$$\text{Начала фаз} \dots \dots \dots 1_n \quad 41_n \quad 81_n$$

$$\text{Концы фаз} \dots \dots \dots 16_n \quad 56_n \quad 6_n$$

$$\text{Поворотные соединения } 80_n \text{ — } 5_n \quad 30_n \text{ — } 45_n \quad 70_n \text{ — } 85_n$$

Например, для I фазы схема обмотки будет

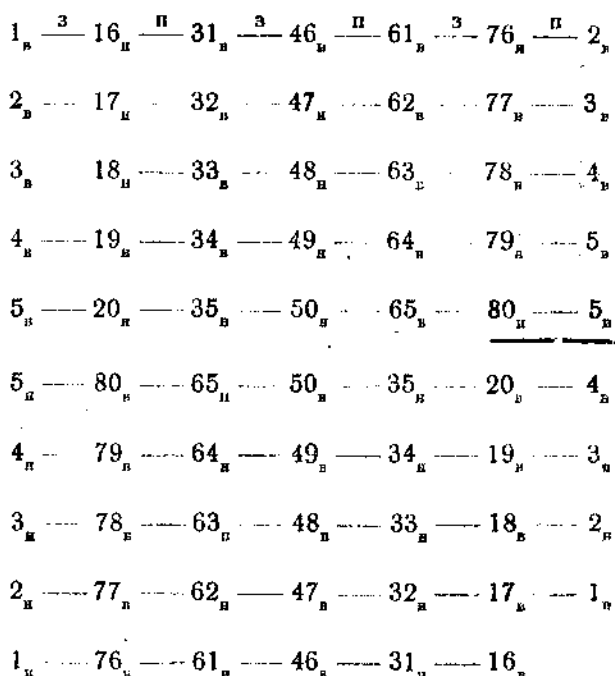


Схема обмотки показана на фиг. 100, при чем для ясности вычерчена полностью только I фаза, а для двух других показаны начала и концы (соединенные в звезду).

Тогда плотность тока

$$\Delta_2 = \frac{I_2}{q_r} = \frac{212}{49} = 4,33 \text{ A/mm}^2,$$

что вполне допустимо.

Проводники берем квадратными размерами $7 \times 7 \text{ mm}$, а с изоляцией (ВВ по германским нормам) — $7,6 \times 7,6 \text{ mm}$.

Толщина пресшпановой изоляции впадины

$$a_n = 0,4 + \frac{E_2}{1000} = 0,4 + \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 1000} \approx 0,6 \text{ mm}.$$

Тогда ширина впадины будет равна

$$b_{n2} = 2 \cdot 0,6 + 7,6 = 8,8 \text{ mm}.$$

Высота впадины

$$h_{n2} = 2 \cdot 0,6 + 2 \cdot 7,6 + 0,6 + 0,8 + 0,5 + 3,7 = 22 \text{ mm}.$$

Здесь учтены, кроме изоляции самой впадины, еще пресшпановая прослойка между проводниками (0,6 mm), пресшпановая прокладка под клином (0,8 mm), толщина клина (3,7 mm) и выступ (0,5 mm). Расположение проводников и размеры впадин показаны на фиг. 101.

Отношение

$$\frac{h_{n2}}{b_{n2}} = \frac{22}{8,8} = 2,5 < 4.$$

Отношение

$$\frac{h_{n2}}{h_{n1}} = \frac{22}{29,4} \approx 0,75.$$

Зубцовый шаг по окружности, проходящей через основания зубцов,

$$t_{s'' \min} = \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_{n2})}{u_2}$$

Так как

$$u_2 = 2 \cdot q_2 \cdot p \cdot m_2 = 2 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3 = 90,$$

то

$$t_{s'' \min} = \frac{\pi(48 - 2 \cdot 0,08 - 2 \cdot 2,2)}{90} = 1,52 \text{ см.}$$

Наименьшая ширина зубца

$$Z''_{\min} = t_{s'' \min} - b_{n2} = 1,52 - 0,88 = 0,64 \text{ см.}$$

При

$$t_{s'' \max} = \frac{\pi(D - 2\delta)}{u_2} = \frac{\pi(48 - 2 \cdot 0,08)}{90} = 1,67 \text{ см}$$

максимальная индукция в зубцах ротора

$$B_{s'' \max} = \frac{t_{s'' \max} \cdot l_l \cdot B_l}{0,9(l - bL) \cdot Z''_{\max}} = \frac{1,67 \cdot 23,66 \cdot 6850}{0,9(26 - 3 \cdot 1) \cdot 0,64} = 20500,$$

что вполне допустимо.

Омическое сопротивление обмотки статора

$$r_1 = \gamma_s \frac{2w_1}{a_1} \cdot \frac{l_{a1}}{48 \cdot q_s}$$

Длина полувитка

$$l_{a1} = l + 1,4\tau + (3 + 8) = 26 + 1,4 \cdot 25,1 + (3 + 8) = 64,2 \div 69,2 \text{ см.}$$

Примем

$$l_{a1} \approx 67 \text{ см} = 0,67 \text{ м.}$$

Для статора коэффициент

$$\gamma_r = 1 + \frac{x^2 - 0,2}{15,25(1 + \lambda)} \cdot d^4 = 1 + \frac{9^2 - 0,2}{15,25 \left(1 + \frac{26}{41}\right)} \cdot 0,25^4 = 1,013.$$

Тогда

$$r_1 = 1,013 \frac{2 \cdot 300}{1} \cdot \frac{0,67}{48 \cdot 4,909} = 1,73 \text{ }\Omega.$$

Для ротора коэффициент

$$\gamma_r = 1 + \frac{x^2 - 0,2}{9(1 + \lambda)} \cdot h^4.$$

Для ротора

$$l_{a2} = l + 1,3\tau + (3 + 6) = 26 + 1,3 \cdot 25,1 + (3 + 6) = 61,6 \div 64,6 \text{ см.}$$

Примем

$$l_{a2} \approx 63 \text{ см} = 0,63 \text{ м.}$$

Тогда

$$\gamma_r = 1 + \frac{2^2 - 0,2}{9 \left(1 + \frac{26}{37}\right)} \cdot 0,7^4 = 1,06.$$

Сопротивление ротора

$$r_2 = \gamma_r \frac{2w_2}{a_2} \cdot \frac{l_{a2}}{48 \cdot q_r} = 1,06 \frac{2 \cdot 30}{1} \cdot \frac{0,63}{48 \cdot 49} = 0,017 \text{ }\Omega,$$

а приведенное к статору

$$r_2' = r_2 \frac{m_1 \cdot w_1^2 \cdot f_1^2}{m_2 \cdot w_2^2 \cdot f_2^2} = 0,017 \frac{3 \cdot 300^2 \cdot 0,958^2}{3 \cdot 30^2 \cdot 0,957^2} = 1,7 \text{ }\Omega.$$

Сопротивление короткого замыкания

$$r_k = r_1 + r_2' = 1,73 + 1,7 = 3,43 \text{ } \Omega.$$

Контактные кольца делаем шириной 25 мм и на каждом кольце устанавливаем по две угольных щетки марки „МГ“¹⁾ размерами 20 × 15 мм.

Тогда плотность тока при переходе со щетки на кольцо

$$\Delta_b = \frac{I_a}{F_b} = \frac{212}{2 \cdot 2,0 \cdot 1,5} \approx 35,3 \text{ A/cm}^2,$$

что для щеток марки „МГ“ — нормально.

Диаметр колец определяем по линейной скорости для щеток „МГ“

$$v_k \approx 10 \text{ м/сек.}$$

Тогда

$$D_k \approx \frac{60 \cdot v_k}{\pi \cdot n} \cdot 10^2 \approx \frac{60 \cdot 10 \cdot 10^2}{\pi \cdot 1000} = 19,1 \text{ см.}$$

Окончательно выбираем диаметр колец, по германским нормам, равным

$$D_k = 200 \text{ мм.}$$

Принимая для нашего двигателя (гл. III, 1)

$$\varepsilon = 0,02,$$

найдем ЭДС статора

$$E_1' = E_1 (1 - \varepsilon) = 1730 (1 - 0,02) = 1695 \text{ В.}$$

Магнитный поток одного полюса

$$\Phi = \frac{E_1' \cdot 10^8}{\pi \sqrt{2} \cdot f \cdot w_1 \cdot f_1} = \frac{1695 \cdot 10^8}{\pi \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 300 \cdot 0,958} = 2,66 \cdot 10^6.$$

Подсчитаем теперь теоретический воздушный промежуток

$$\delta' = k_1 \cdot \delta.$$

Величина

$$\gamma = \frac{a_{4s} + a_{4r}}{\delta} = \frac{0,3 + 0,25}{0,08} = 6,88.$$

По кривой фиг. 62

$$X = 2,65.$$

Далее

$$\delta_s = \frac{a_{4s} \cdot \delta}{a_{4s} + a_{4s}} = \frac{0,3 \cdot 0,08}{0,3 + 0,25} = 0,0436$$

$$\delta_r = \frac{a_{4r} \cdot \delta}{a_{4s} + a_{4r}} = \frac{0,25 \cdot 0,08}{0,3 + 0,25} = 0,0364$$

$$k_s = \frac{t_{s \min}'}{t_{s \min}' - a_{4r} + X \cdot \delta_s} = \frac{2,09}{2,09 - 0,3 + 2,65 \cdot 0,0436} = 1,091$$

$$k_r = \frac{t_{s \max}''}{t_{s \max}'' - a_{4r} + X \cdot \delta_r} = \frac{1,67}{1,67 - 0,25 + 2,65 \cdot 0,0364} = 1,1.$$

Коэффициент

$$k_1 = \frac{\delta_s \cdot k_s + \delta_r \cdot k_r}{\delta} = \frac{0,0436 \cdot 1,091 + 0,0364 \cdot 1,1}{0,08} = 1,095.$$

¹⁾ По проекту Общесоюзного стандарта.

Теоретический воздушный промежуток

$$\delta' = 1,095 \cdot 0,08 = 0,0876 \text{ см.}$$

Длина чистого железа

$$l_0 = 0,9 (l - bL) = 0,9 (26 - 3 \cdot 1) = 20,7 \text{ см.}$$

Примем индукции

$$B_{a1} = 12\,000 \text{ и } B_{a2} = 13\,000.$$

Тогда высота тела статора

$$h_s = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{a1} \cdot l_0} = \frac{2,66 \cdot 10^6}{2 \cdot 12\,000 \cdot 20,7} = 5,35 \text{ см} \approx 5,5 \text{ см.}$$

Высота тела ротора

$$h_r = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{a2} \cdot l_0} = \frac{2,66 \cdot 10^6}{2 \cdot 13\,000 \cdot 20,7} = 4,95 \text{ см} \approx 5 \text{ см.}$$

Окончательно

$$B_{a1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_s \cdot l_0} = \frac{2,66 \cdot 10^6}{2 \cdot 5,5 \cdot 20,7} = 11\,700;$$

$$B_{a2} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_r \cdot l_0} = \frac{2,66 \cdot 10^6}{2 \cdot 5 \cdot 20,7} = 12\,850.$$

Начертив эскиз (фиг. 102), определяем длины:

$$\frac{1}{2} l_s = 16 \text{ см и } \frac{1}{2} l_r = 13 \text{ см.}$$

При синусоидальном распределении индукции

$$B_l = \frac{\Phi}{0,637 \cdot \tau \cdot l_l} = \frac{2,66 \cdot 10^6}{0,637 \cdot 25,1 \cdot 23,66} = 7\,030.$$

Число ампервитков для воздуха

$$AW_l = 0,8 \cdot B_l \cdot \delta' = 0,8 \cdot 7\,030 \cdot 0,0876 \approx 495.$$

Определим теперь ампервитки для зубцов.

Статор.

$$t'_{s \min} = 2,09 \text{ см; } Z_{\min} = 0,9 \text{ см}$$

$$Z_{cp} = \frac{(D + h_{n1}) \pi}{u_1} - b_{n1} = \frac{(48 + 2,94) \pi}{72} - 1,19 = 1,03 \text{ см;}$$

$$Z_{s \max} = \frac{(D + 2h_{n1}) \pi}{u_1} - b_{n1} = \frac{(48 + 2 \cdot 2,94) \pi}{72} - 1,19 = 1,16 \text{ см;}$$

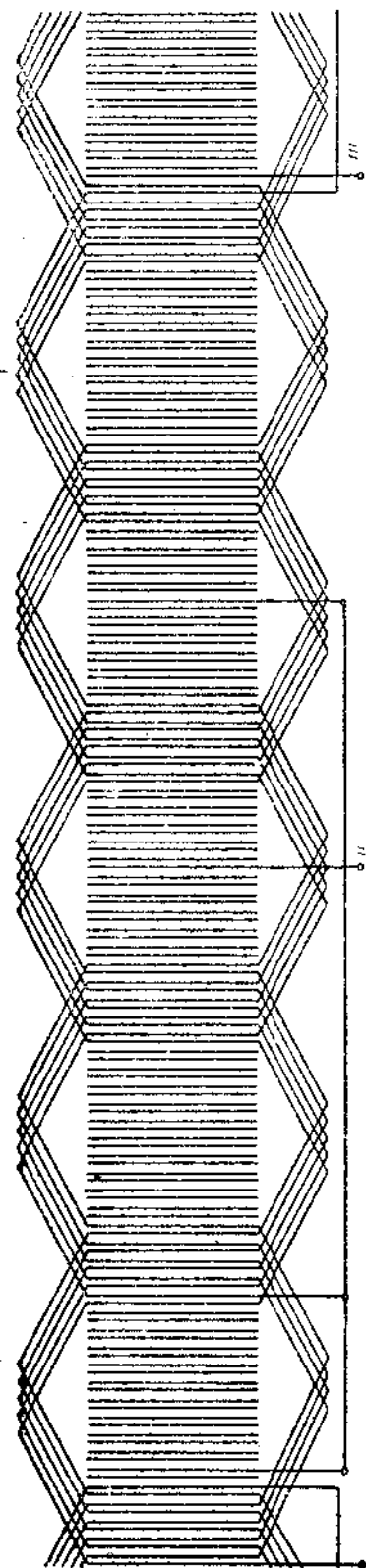
$$B_{s \max} = \frac{B_l \cdot t'_{s \min} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\min}} = \frac{7\,030 \cdot 2,09 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,9} = 18\,700;$$

$$B_{s \text{cp}} = \frac{B_l \cdot t'_{s \min} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{cp}} = \frac{7\,030 \cdot 2,09 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 1,03} = 16\,300;$$

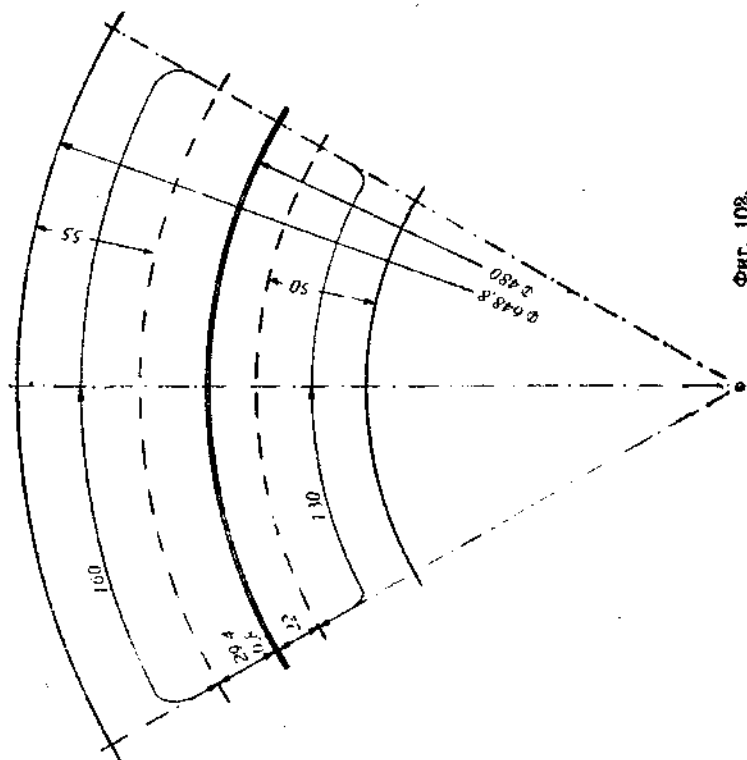
$$B_{s \min} = \frac{B_l \cdot t'_{s \min} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\max}} = \frac{7\,030 \cdot 2,09 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 1,16} = 14\,500.$$

Так как $B_{s \max} > 18\,000$, то определяем

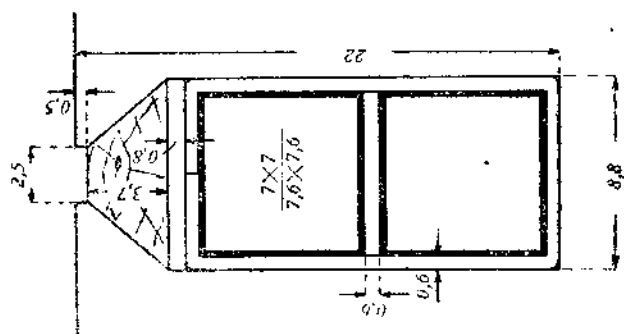
$$k_s' = \frac{b_{n1} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\min}} = \frac{1,19 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,9} = 1,51.$$



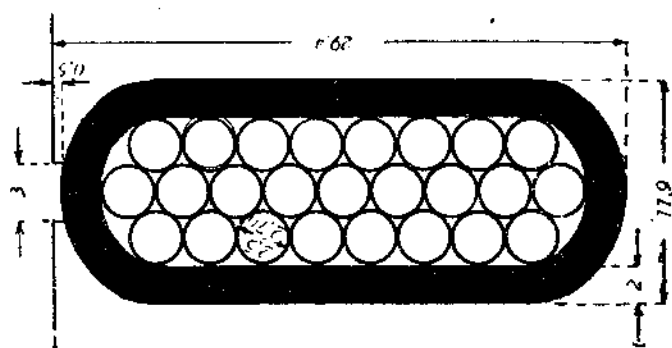
Фиг. 100.



Фиг. 102.



Фиг. 101.



Фиг. 99.

Тогда по кривой фиг. 65

а по кривым фиг. 66

$$aw_{s\max} = 140;$$

$$aw_{ср} = 44; \quad aw_{s\min} = 21;$$

$$AW_{sr} = l_{sr} \frac{aw_{s\max} + 4aw_{ср} + aw_{s\min}}{6} = 2,94 \frac{140 + 4 \cdot 44 + 21}{6} = 165.$$

Ротор.

$$t_s''_{\max} = 1,67 \text{ cm}; \quad Z_{\min} = 0,64 \text{ cm}$$

$$Z_{ср} = \frac{(D - 2\delta - h_{n2})\pi}{u_2} - b_{n2} = \frac{(48 - 2 \cdot 0,08 - 2,2)\pi}{90} - 0,88 = 0,72 \text{ cm};$$

$$Z_{\max} = \frac{(D - 2\delta)\pi}{u_2} - b_{n2} = \frac{(48 - 2 \cdot 0,08)\pi}{90} - 0,88 = 0,79 \text{ cm};$$

$$B_{st\max} = \frac{B_l \cdot t_s''_{\max} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\min}} = \frac{7030 \cdot 1,67 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,64} = 21000;$$

$$B_{st\ср} = \frac{B_l \cdot t_s''_{\max} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{ср}} = \frac{7030 \cdot 1,67 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,72} = 18650;$$

$$B_{st\min} = \frac{B_l \cdot t_s''_{\max} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\max}} = \frac{7030 \cdot 1,67 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,79} = 17000;$$

$$k_s' = \frac{b_{n2} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\min}} = \frac{0,88 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,64} = 1,57;$$

$$k_s'' = \frac{b_{n2} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{ср}} = \frac{0,88 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,72} = 1,4.$$

Тогда по кривым фиг. 65

$$aw_{s\max} = 355 \text{ и } aw_{ср} = 135$$

и по кривым фиг. 66

$$aw_{s\min} = 65;$$

$$AW_{sr} = l_{sr} \frac{aw_{s\max} + 4aw_{ср} + aw_{s\min}}{6} = 2,2 \frac{355 + 4 \cdot 135 + 65}{6} = 352.$$

Коэффициент

$$k_z = 1 + \frac{AW_{sr} + AW_{st}}{AW_l} = 1 + \frac{165 + 352}{495} = 2,045.$$

По кривой I фиг. 67 этой величине соответствует значение

$$\alpha_1 = 0,712.$$

Тогда истинное значение

$$B_l = \frac{\Phi}{\alpha_1 \cdot \tau \cdot l_l} = \frac{2,66 \cdot 10^6}{0,712 \cdot 25,1 \cdot 23,66} = 6300$$

$$AW_l = 0,8 \cdot 6300 \cdot 0,0876 = 442.$$

Статор.

$$B_{st\max} = \frac{6300 \cdot 2,09 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,9} = 16750;$$

$$B_{st\ср} = \frac{6300 \cdot 2,09 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 1,03} = 14600;$$

$$B_{st\min} = \frac{6300 \cdot 2,09 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 1,16} = 13000.$$

По кривым фиг. 66

$$aw_{s, \max} = 57; \quad aw_{s, \text{cp}} = 22; \quad aw_{s, \min} = 11,5;$$

$$AW_s = 2,94 \frac{57 + 4 \cdot 22 + 11,5}{6} \approx 77.$$

Ротор.

$$B_{r1, \max} = \frac{6300 \cdot 1,67 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,64} = 18800$$

$$B_{r1, \text{cp}} = \frac{6300 \cdot 1,67 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,72} = 16700$$

$$B_{r1, \min} = \frac{6300 \cdot 1,67 \cdot 23,66}{20,7 \cdot 0,79} = 15200.$$

По кривым фиг. 65

$$aw_{r, \max} = 150.$$

По кривым фиг. 66

$$aw_{r, \text{cp}} = 55; \quad aw_{r, \min} = 29;$$

$$AW_r = 2,2 \frac{150 + 4 \cdot 55 + 29}{6} = 146.$$

Коэффициент

$$k_s = 1 + \frac{77 + 146}{442} = 1,51,$$

чему, по кривой II фиг. 67, соответствует

$$\alpha_1 = 0,712,$$

т.е. совпадение получилось полным.

Для тела статора ($B_{a1} = 11700$) по фиг. 66

$$aw_s \approx 7;$$

$$AW_s = 0,637 \cdot \frac{1}{2} I_s \cdot aw_s = 0,637 \cdot 16 \cdot 7 \approx 72.$$

Для тела ротора ($B_{a2} = 12850$)

$$aw_r \approx 11.$$

$$AW_r = 0,637 \cdot \frac{1}{2} I_r \cdot aw_r = 0,637 \cdot 13 \cdot 11 \approx 91.$$

Полное число ампервитков

$$AW_k = AW_1 + AW_w + AW_r + AW_s + AW_r = 442 + 77 + 146 + 72 + 91 = 828.$$

Безваттная составляющая тока холостого хода

$$I_{01} = \frac{0,74 \cdot p \cdot AW_k}{w_1 \cdot f_1} = \frac{0,74 \cdot 3 \cdot 828}{300 \cdot 0,958} = 6,4 \text{ A.}$$

Определим теперь индуктивное сопротивление обмоток.

Статор.

По уравнению (136)

$$\lambda_n = k_t \frac{h_1}{3a} + 0,66 + \frac{h_4}{a_4};$$

$$k_t = 0,9$$

$$h_1 = 16,6 \text{ мм (определяем по чертежу впадины, фиг. 98)}$$

$$a = b_{n1} = 11,9 \text{ мм}; \quad h_4 = 0,5 \text{ мм}; \quad a_4 = 3 \text{ мм};$$

$$\lambda_n = 0,9 \frac{16,6}{3 \cdot 11,9} + 0,66 + \frac{0,5}{3} = 1,245;$$

$$x_{n1} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_1}{p} \cdot \frac{\lambda_n}{q_1} = 0,158 \frac{50}{100} \left(\frac{300}{100} \right)^2 \cdot \frac{23,66}{3} \cdot \frac{1,245}{4} = 1,75 \text{ } \Omega;$$

$$\lambda_k = \frac{(l''_{\text{max}} - 0,75(a_{42} + a_{47}))^2}{6 \cdot l''_{\text{max}} \cdot \delta} = \frac{[1,67 - 0,75(0,3 + 0,25)]^2}{6 \cdot 1,67 \cdot 0,03} = 1,97;$$

$$x_{p1} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_1}{p} \cdot \frac{\lambda_k}{q_1} = 0,158 \frac{50}{100} \left(\frac{300}{100} \right)^2 \cdot \frac{23,66}{3} \cdot \frac{1,97}{4} = 2,77 \text{ } \Omega;$$

$$x_{s1} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_2}{p} \cdot \lambda_s = 0,158 \frac{50}{100} \left(\frac{300}{100} \right)^2 \cdot \frac{41}{3} \cdot 0,25 = 2,42 \text{ } \Omega;$$

$$E_{d1} = 2,22 \cdot f \cdot z_1 (f_{11} - f_{12}) \Phi \cdot 10^{-8} =$$

$$= 2,22 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 300 (0,9643 - 0,9571) \cdot 2,26 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 10,85 \text{ В};$$

$$x_{d1} = \frac{E_{d1}}{I_{d1}} = \frac{10,85}{6,4} = 1,72 \text{ } \Omega;$$

$$x_t = x_{n1} + x_{p1} + x_{s1} + x_{d1} = 1,75 + 2,77 + 2,42 + 1,72 = 8,66 \text{ } \Omega.$$

Ротор.

По уравнению (134)

$$\lambda_n' = \lambda_n = k_t \frac{h_1}{3a} + \frac{h_2}{a} + \frac{h_3}{a_2} + \frac{h_4}{a_4};$$

$$k_t = 0,9;$$

$$h_1 = 2h_1' + h' = 2 \cdot 7 + 1,2 = 15,2 \text{ мм}; \quad h_2 = 0,3 + 0,6 + 0,8 = 1,7 \text{ мм};$$

$$h_3 = 3,7 \text{ мм}; \quad h_4 = 0,5 \text{ мм};$$

$$a = b_{n2} = 8,8 \text{ мм}; \quad a_2 = \frac{a_1 + a}{2} = \frac{2,5 + 8,8}{2} = 5,65 \text{ мм}; \quad a_4 = 2,5 \text{ мм};$$

$$\lambda_n' = \lambda_n = 0,9 \cdot \frac{15,2}{3 \cdot 8,8} + \frac{1,7}{8,8} + \frac{3,7}{5,65} + \frac{0,5}{2,5} = 1,566;$$

$$x_{n2} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_1}{p} \cdot \frac{\lambda_n}{q_2} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{30}{100} \right)^2 \cdot \frac{23,66}{3} \cdot \frac{1,566}{5} = 0,0176 \text{ } \Omega;$$

$$\lambda_k = \frac{[l'_{\text{min}} - 0,75(a_{42} + a_{47})]^2}{6 \cdot l'_{\text{min}} \cdot \delta} = \frac{[2,09 - 0,75(0,3 + 0,25)]^2}{6 \cdot 2,09 \cdot 0,08} = 2,8;$$

$$x_{p2} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_1}{p} \cdot \frac{\lambda_k}{q_2} = \frac{1 + g}{2} =$$

$$= 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{30}{100} \right)^2 \cdot \frac{23,66}{3} \cdot \frac{2,8}{5} \cdot \frac{1 + 0,5}{2} = 0,0236 \text{ } \Omega;$$

$$x_{s2} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_2}{p} \cdot \lambda_s = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{30}{100} \right)^2 \cdot \frac{37}{3} \cdot 0,25 = 0,0219 \text{ } \Omega;$$

$$E_{d2} = 2,22 \cdot f \cdot z_2 (f_{22} - f_{21}) \cdot \Phi \cdot 10^{-8} = \\ = 2,22 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 30 (0,9546 - 0,9517) \cdot 2,26 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 0,436 \text{ В};$$

$$x_{d2} = \frac{E_{d2}}{I_{01} \left(\frac{m_1 \cdot f_1 \cdot w_1}{m_2 \cdot f_2 \cdot w_2} \right)} = \frac{0,436}{6,4 \left(\frac{3 \cdot 0,958 \cdot 300}{3 \cdot 0,957 \cdot 30} \right)} = 0,0068 \text{ }\Omega;$$

$$x_2 = x_{n2} + x_{p2} + x_{s2} + x_{d2} = 0,0176 + 0,0236 + 0,0219 + 0,0068 = 0,0699 \text{ }\Omega,$$

а приведенное к статору

$$x_2' = x_2 \frac{m_1 \cdot w_1^2 \cdot f_1^2}{m_2 \cdot w_2^2 \cdot f_2^2} = 0,0699 \frac{3 \cdot 300^2 \cdot 0,958^2}{3 \cdot 30^2 \cdot 0,957^2} = 7 \text{ }\Omega.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = x_1 + x_2' = 8,66 + 7 = 15,66 \text{ }\Omega.$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = \sqrt{3,43^2 + 15,66^2} = 16 \text{ }\Omega.$$

Сила тока короткого замыкания

$$I_k = \frac{E_1}{z_k} = \frac{1730}{16} = 108 \text{ А}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k} = \frac{3,43}{16} = 0,214.$$

Идеальный ток короткого замыкания

$$I_{k1} = \frac{E_2}{x_k} = \frac{1730}{15,66} = 110 \text{ А}.$$

Отношения

$$\frac{I_k}{I_1} = \frac{108}{23,6} = 4,58 > 4 \quad \text{и} \quad \frac{I_{k1}}{I_1} = \frac{110}{23,6} = 4,66 > 4,35.$$

Вес статорного железа

$$G_{as} = 24,5 \cdot l_0 \cdot h_s (D + 2h_{n1} + h_s) \cdot 10^{-3} = \\ = 24,5 \cdot 20,7 \cdot 5,5 (48 + 2 \cdot 2,94 + 5,5) \cdot 10^{-3} \approx 166 \text{ кг}.$$

Вес статорных зубцов

$$G_{sz} = 7,8 \cdot l_0 \cdot h_{n1} [(D + h_{n1})\pi - u_1 \cdot b_{n1}] 10^{-3} = \\ = 7,8 \cdot 20,7 \cdot 2,94 (48 + 2,94)\pi - 72 \cdot 1,19] 10^{-3} = 35,4 \text{ кг}.$$

Потеря на гистерезис для тела статора

$$(W_h)_{as} = k_h \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{0,637 \cdot B_{s1}}{10000} \right)^2 G_{as}.$$

Для обыкновенного динамного железа толщиной 0,5 мм

$$\varepsilon = 4,4.$$

Принимая $k_h = 2$, получим

$$(W_h)_{as} = 2 \cdot 4,4 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{0,637 \cdot 11700}{10000} \right)^2 \cdot 166 = 404 \text{ Вт}.$$

Потеря на гистерезис для зубцов статора при $k_h = 1,2$

$$(W_h)_z = k_h \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{B_{\text{сз ср}}}{10000} \right)^2 \cdot G_{sz} = 1,2 \cdot 4,4 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{14800}{10000} \right)^2 \cdot 35,4 = 200 \text{ Вт}.$$

Потеря на токи Фуко в теле статора

$$(W_f)_{st} = k_f \cdot \sigma_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{0,637 \cdot B_{a1}}{10\,000} \right)^2 \cdot G_{st}.$$

Для отношения

$$\frac{h_s}{\tau} = \frac{5,5}{25,1} = 0,219.$$

По кривой фиг. 74

$$k_f = 1,1.$$

Так как $\sigma_f = 5,6$, то

$$(W_f)_{st} = 1,1 \cdot 5,6 \left(\frac{50}{100} \cdot \frac{0,637 \cdot 11\,700}{10\,000} \right)^2 \cdot 166 = 152 \text{ W}.$$

Потеря на токи Фуко для зубцов статора при $k_f = 1,5$

$$(W_f)_{st} = k_f \cdot \sigma_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B_{st\,cp}}{10\,000} \right)^2 \cdot G_{st} = 1,5 \cdot 5,6 \left(\frac{50}{100} \cdot \frac{14\,600}{10\,000} \right)^2 \cdot 35,4 = 158 \text{ W}.$$

Поверхностная потеря статора

$$(W_o)_s = \pi D (l - bL) \frac{t_s'_{\min} - a_{st}}{t_s'_{\min}} \cdot \frac{1}{2} \cdot k_{os} \left(\frac{u_s \cdot n_s}{10\,000} \right)^{1,5} \left(\frac{t_s''_{\max} \cdot \beta_s \cdot k_{cs} \cdot B_l}{1\,000} \right)^2 \cdot 10^{-4},$$

$$k_{os} = 2,7.$$

При

$$\frac{a_{st}}{\delta} = \frac{0,25}{0,08} = 3,12$$

коэффициент

$$\beta_s = 0,2291;$$

$$k_{cs} = \frac{t_s''_{\max}}{t_s''_{\max} + \delta - \frac{3}{4} a_{st}} = \frac{1,67}{1,67 + 0,08 - \frac{3}{4} \cdot 0,25} = 1,07;$$

$$(W_o)_s = \pi \cdot 48 (26 - 3 \cdot 1) \frac{2,09 - 0,3}{2,09} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2,7 \left(\frac{90 \cdot 1\,000}{10\,000} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,67 \cdot 0,2291 \cdot 1,07 \cdot 6\,300}{1\,000} \right)^2 \cdot 10^{-4} = 72 \text{ W}.$$

Поверхностная потеря ротора

$$(W_o)_r = \pi (D - 2\delta) (l - bL) \frac{t_s''_{\max} - a_{st}}{t_s''_{\max}} \cdot \frac{1}{2} \cdot k_{or} \left(\frac{u_1 \cdot n_s}{10\,000} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{t_s'_{\min} \cdot \beta_1 \cdot k_{cr} \cdot B_l}{1\,000} \right)^2 \cdot 10^{-4};$$

$$k_{or} = 2,7.$$

При

$$\frac{a_{st}}{\delta} = \frac{0,3}{0,08} = 3,75$$

коэффициент

$$\beta_1 = 0,263;$$

$$k_{cr} = \frac{t_s'_{\min}}{t_s'_{\min} + \delta - \frac{3}{4} a_{st}} = \frac{2,09}{2,09 + 0,08 - \frac{3}{4} \cdot 0,3} = 1,075.$$

$$(W_o)_r = \pi (48 - 2 \cdot 0,08) (26 - 3 \cdot 1) \frac{1,67 - 0,25}{1,67} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2,7 \left(\frac{72 \cdot 1\,000}{10\,000} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{2,09 \cdot 0,263 \cdot 1,075 \cdot 6\,300}{1\,000} \right)^2 \cdot 10^{-4} = 107 \text{ W}.$$

Амплитуда колебаний индукции в зубцах статора

$$(B_p)_1 = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2t_{\text{ср}}'} (B_{\text{ср}})_1.$$

Так как

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{a_{4r}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_{4r}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,25}{0,08}\right)^2}{5 + \frac{0,25}{0,08}} = 1,2,$$

$$(B_p)_1 = \frac{1,2 \cdot 0,08}{2 \cdot 2,08} \cdot 14\,600 = 335.$$

Пульсационная потеря в статоре

$$(W_p)_s = 0,14 \left[\frac{u_1 \cdot n_1}{10\,000} \cdot \frac{(B_p)_1}{1\,000} \right]^2 \cdot G_w = 0,14 \left[\frac{90 \cdot 1\,000}{10\,000} \cdot \frac{335}{1\,000} \right]^2 \cdot 35,4 = 45 \text{ W.}$$

Для ротора

$$(B_p)_2 = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2t_{\text{ср}}''} (B_{\text{ср}})_2.$$

Так как

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{a_{4s}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{a_{4s}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,3}{0,08}\right)^2}{5 + \frac{0,3}{0,08}} = 1,61,$$

$$(B_p)_2 = \frac{1,61 \cdot 0,08}{2 \cdot 1,67} \cdot 16\,700 = 644.$$

Пульсационная потеря в роторе

$$(W_p)_r = 0,14 \left[\frac{u_2 \cdot n_2}{10\,000} \cdot \frac{(B_p)_2}{1\,000} \right]^2 \cdot G_w.$$

Вес зубцов ротора

$$G_w = 7,8 \cdot l_0 \cdot h_{n2} [(D - 2\delta - h_{n2})\pi - u_2 \cdot b_{n2}] \cdot 10^{-3} = \\ = 7,8 \cdot 20,7 \cdot 2,2 [(48 - 2 \cdot 0,08 - 2,2)\pi - 90 \cdot 0,88] 10^{-3} = 22,8 \text{ kg.}$$

$$(W_p)_r = 0,14 \left(\frac{72 \cdot 1\,000}{10\,000} \cdot \frac{644}{1\,000} \right)^2 \cdot 22,8 = 68 \text{ W.}$$

Потерю на трение на кольцах не определяем, так как двигатель снабжен приспособлением для короткого замыкания ротора и подъема щеток.

Диаметр вала

$$d_n \approx 28 \sqrt[3]{\frac{P}{n_s}} \approx 28 \sqrt[3]{\frac{100}{1\,000}} \approx 13 \text{ cm} = 130 \text{ mm.}$$

Диаметр цапфы

$$d_s \approx 0,8 \cdot d_n = 0,8 \cdot 13 = 10,4 \text{ cm} \approx 10 \text{ cm} = 100 \text{ mm.}$$

Тогда

$$v_s = \frac{\pi d_s \cdot n_s}{60} = \frac{\pi \cdot 10 \cdot 1\,000}{60} = 524 \text{ cm/сек} < 550.$$

Длина цапфы

$$l_s \approx 2,5 \cdot d_s = 2,5 \cdot 10 = 25 \text{ cm} = 250 \text{ mm.}$$

Так как

$$m_s = 2 \text{ и } T_s = 12v_s + 20 = 12 \cdot 5,24 + 20 = 82,8^\circ \text{ C,}$$

то потеря на трение в подшипниках

$$(W_f)_s = m_s \frac{26}{T_s} \cdot d_s \cdot l_s \cdot v_s^{1,5} = 2 \cdot \frac{26}{82,8} \cdot 10 \cdot 25 \cdot 5,24^{1,5} = 1\,885 \text{ W.}$$

Потерю на трение о воздух примем

$$(W_r)_1 = 0,20 (W_r)_2 = 0,20 \cdot 1885 \approx 180 \text{ W.}$$

Оминеская потеря в обмотке статора при холостом ходе

$$(W_R)_0 = m_1 \cdot I_{01}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 6,4^2 \cdot 1,73 = 213 \text{ W.}$$

Сумма потерь при холостом ходе

$$W_0 = (W_h)_{0s} + (W_h)_{0z} + (W_l)_{0s} + (W_l)_{0z} + (W_o)_s + (W_o)_r + (W_p)_s + \\ + (W_p)_r + (W_r)_s + (W_r)_z + (W_R)_0 = 404 + 200 + 152 + 158 + 72 + \\ + 107 + 45 + 68 + 1885 + 180 + 213 \approx 3500 \text{ W.}$$

Ваттная составляющая тока холостого хода

$$I_{02} = \frac{W_0}{3 \cdot E_1} = \frac{3500}{3 \cdot 1730} = 0,68 \text{ A.}$$

Полный ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{01}^2 + I_{02}^2} = \sqrt{6,4^2 + 0,68^2} \approx 6,45 \text{ A.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{02}}{I_0} = \frac{0,68}{6,45} \approx 0,105.$$

Максимальная мощность двигателя

$$P_{\max} = 3 \cdot E_1 \frac{I_k - I_0}{2(1 + \cos \varphi_k)} = 3 \cdot 1730 \frac{108 - 6,45}{2(1 + 0,214)} = 217 \text{ kW.}$$

Коэффициент перегрузки

$$k_p = \frac{P_{\max}}{P} = \frac{217}{100} = 2,17.$$

По ОСТ 679 для нашего двигателя должно быть

$$k_p \geq 1,8.$$

По „нормам Союза германских электротехников“, для нашего двигателя должно быть

$$\{ k_p = 2 + 2,5.$$

Таким образом, требования и тех и других норм соблюдены.

Потери, обуславливающие нагревание железа статора

$$W_s = (W_h)_{0s} + (W_h)_{0z} + (W_l)_{0s} + (W_l)_{0z} + (W_o)_s + (W_p)_s + \frac{l}{l_{a1}} \cdot m_2 \cdot I_1^2 \cdot r_1 = \\ = 404 + 200 + 152 + 158 + 72 + 45 + \frac{26}{67} \cdot 3 \cdot 23,6^2 \cdot 1,73 = 2156 \text{ W.}$$

Поверхность охлаждения статора

$$Q_s = \pi (D + 2h_{n1} + 2h_s) (l - bL) + \pi (h_{n1} + h_s) (D + h_{n1} + h_s) (2 + b) = \\ = \pi (48 + 2 \cdot 2,94 + 2 \cdot 5,5) (26 - 3 \cdot 1) + \pi (2,94 + 5,5) (48 + 2,94 + 5,5) (2 + 8) = \\ = 12165 \text{ cm}^2.$$

Принимая $C_s = 275$, найдем повышение температуры статора

$$t_s = C_s \cdot \frac{W_s}{Q_s} = 275 \cdot \frac{2156}{12165} = 48,7^\circ \text{ C,}$$

что допустимо для данной изоляции как по русским, так и по германским нормам ($t_{s \max} = 60^\circ$ — для пропитанной волокнистой изоляции по германским и $t_{s \max} = 60^\circ$ — для изоляции класса А по русским нормам).

Для определения повышения температуры меди статора найдем величины

$$a^2 = 234 \left(\frac{U_n}{\delta_1 \cdot q_n} - \frac{\gamma \cdot \Delta_1^2}{1000} \right) 10^{-4},$$

где U_n по фиг. 98 составляет 8,64 см,

$$\delta_1 = 0,2 + 0,013 = 0,213 \text{ см},$$

$$q_n = n_{a1} \cdot q_s = 25 \cdot 4,909 \approx 123 \text{ мм}^2,$$

$$\gamma = 1,013,$$

$$\Delta_1 = 4,8 \text{ А/мм}^2.$$

Тогда

$$a^2 = 234 \left(\frac{8,64}{0,213 \cdot 123} - \frac{1,013 \cdot 4,8^2}{1000} \right) 10^{-4} = 71,6 \cdot 10^{-4}$$

$$a = 8,46 \cdot 10^{-2}$$

$$b = \gamma \frac{0,94 + 0,004(t_s + 18)}{170} \cdot \Delta_1^2 = 1,013 \frac{0,94 + 0,004(48,7 + 18)}{170} \cdot 4,8^2 = 16,6 \cdot 10^{-3}$$

$$c^2 = \frac{U_k}{25 \left(\delta_a + \frac{1}{1 + 0,03 \cdot v} \right) q_n} - 0,234 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma \cdot \Delta_1^2$$

$$U_k = 8,17 \text{ см}$$

$$\delta_a = 0,1 + 0,013 = 0,113 \text{ см}$$

$$v = 25,1 \text{ м/сек}$$

$$c^2 = \frac{8,17}{25 \left(0,113 + \frac{1}{1 + 0,03 \cdot 25,1} \right) 123} - 0,234 \cdot 10^{-4} \cdot 1,013 \cdot 4,8^2 = 42,3 \cdot 10^{-4}$$

$$c = 6,5 \cdot 10^{-2}$$

$$d = \gamma \frac{0,94 + 0,004(t_s + 20)}{170} \cdot \Delta_1^2 = 1,013 \frac{0,94 + 0,004(48,7 + 20)}{170} \cdot 4,8^2 = 16,7 \cdot 10^{-3}$$

Значения A и C определяем из уравнений

$$a \cdot A \cdot \sin \frac{al_r}{2} = -c \cdot C \cdot \sin \frac{cl_k}{2}$$

$$2 \cdot A \cos \frac{al_r}{2} \cdot \frac{b}{a^2} + t_s = 2 \cdot C \cdot \cos \frac{cl_k}{2} = \frac{d}{c^2}$$

Здесь

$$l_r \approx l + 2 = 26 + 2 = 28 \text{ см} \quad \text{и} \quad l_k = l_{a1} - l_r \approx 67 - 28 = 39 \text{ см}.$$

Тогда

$$8,46 \cdot 10^{-2} \cdot A \cdot 1,4825 = -6,5 \cdot 10^{-2} \cdot C \cdot 1,6538$$

$$2 \cdot A \cdot 1,788 + \frac{16,6 \cdot 10^{-3}}{71,6 \cdot 10^{-4}} + 48,7 = 2 \cdot C \cdot 1,916 + \frac{16,7 \cdot 10^{-3}}{42,3 \cdot 10^{-4}}$$

Решая эти уравнения, получим

$$A = -6,55 \quad \text{и} \quad C = 7,65.$$

Наибольшее превышение температуры меди над температурой окружающей среды

$$t_{k \max} = 2A + \frac{b}{a^2} + t_s = -2 \cdot 6,55 + \frac{16,6 \cdot 10^{-3}}{71,6 \cdot 10^{-4}} + 48,7 \approx 58,8^\circ \text{ С}.$$

Среднее превышение температуры

$$t_k = \frac{1}{l_r} \left(\frac{2A}{a} \operatorname{Ei}n \frac{al_r}{2} + \frac{b}{a^2} \cdot \frac{l_r}{2} \right) + \frac{1}{l_k} \left(\frac{2C}{c} \operatorname{Ei}n \frac{cl_k}{2} + \frac{d}{c^2} \cdot \frac{l_k}{2} \right) + \frac{t_g}{2} =$$

$$= \frac{1}{28} \left(-\frac{2 \cdot 6,55}{8,46 \cdot 10^{-2}} \cdot 1,4825 + \frac{18,8 \cdot 10^{-2}}{71,6 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{28}{2} \right) +$$

$$+ \frac{1}{39} \left(-\frac{2 \cdot 7,65}{6,5 \cdot 10^{-2}} \cdot 1,6538 + \frac{16,7 \cdot 10^{-2}}{42,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{39}{2} \right) + \frac{48,7}{2} = 57,55^\circ \text{C}.$$

Потери, обуславливающие нагревание ротора

$$W_R = (W_o)_r + (W_p)_r + \frac{l}{l_{a2}} m_2 \cdot l_2^2 \cdot r_2 = 107 + 68 + \frac{26}{63} 212^2 \cdot 3 \cdot 0,017 = 1123 \text{ W}.$$

Поверхность охлаждения ротора

$$O_R = \pi(D - 2\delta)(l - bL) +$$

$$+ \pi(h_{a2} + h_r)[(D - 2\delta) - h_{a2} - h_r](2 + b) = \pi(48 - 2 \cdot 0,08)(26 - 3 \cdot 1) +$$

$$+ \pi(2,2 + 5)[(48 - 2 \cdot 0,08) - 2,2 - 5](2 + 3) = 8060.$$

Повышение температуры ротора

$$t_R = C_R \frac{W_R}{O_R(1 + 0,1 \cdot \vartheta)} = 400 \frac{1123}{8060(1 + 0,1 \cdot 25,11)} \approx 16^\circ \text{C}.$$

Повышение температуры подшипников по уравнению (346)

$$t_2 \approx \frac{(W_p)_2' \cdot 5}{\pi \cdot d_2 \cdot l_2} = \frac{943 \cdot 5}{\pi \cdot 10 \cdot 25} \approx 6^\circ \text{C}.$$

Начертив эскиз расположения отдельных частей мотора (фиг. 103), найдем, что $l = 75 \text{ см}$; $a = 45 \text{ см}$; $b = 30 \text{ см}$.

Вес статора

$$G_s = G_{ss} + G_w + (G_{cu})_s.$$

Так как

$$G_{ss} = 166 \text{ кг}; \quad G_w = 35,4 \text{ кг};$$

$$(G_{cu})_s = 2w_1 \cdot m_1 \cdot l_{a1} \cdot q_s \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} =$$

$$= 2 \cdot 300 \cdot 3 \cdot 67 \cdot 4,909 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} \approx 52,8 \text{ кг},$$

$$G_s = 166 + 35,4 + 52,8 = 254,2 \approx 255 \text{ кг}.$$

Вес ротора

$$G_R = (G_{Fe})_r + (G_{cu})_r + G_n + G_s + G_k;$$

$$(G_{Fe})_r = 24,5 \cdot l_0 \cdot h_r(D - 2\delta - 2h_{a2} - h_r)10^{-3} +$$

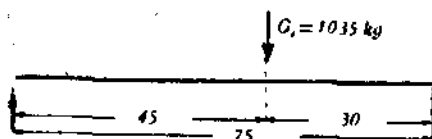
$$+ 7,8 \cdot l_0 \cdot h_{a2}[(D - 2\delta - h_{a2})\pi - u_2 \cdot b_{a2}] \cdot 10^{-3} =$$

$$= 24,5 \cdot 20,7 \cdot 5(48 - 2 \cdot 0,08 - 2 \cdot 2,2 - 5)10^{-3} +$$

$$+ 7,8 \cdot 20,7 \cdot 2,2[(48 - 2 \cdot 0,08 - 2,2)\pi - 90 \cdot 0,88] \cdot 10^{-3} \approx 130 \text{ кг};$$

$$(G_{cu})_r = 2w_2 \cdot m_2 \cdot l_{a2} \cdot q_r \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = 2 \cdot 30 \cdot 3 \cdot 63 \cdot 49 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} \approx 49,5 \text{ кг}$$

$$\left. \begin{aligned} G_n &\approx 140 \text{ кг} \\ G_s &\approx 20 \text{ кг} \\ G_k &\approx 10 \text{ кг} \end{aligned} \right\} \text{ (по эскизам).}$$



Фиг. 103.

то

Тогда

$$G_R = 130 + 49,5 + 140 + 20 + 10 \approx 350 \text{ kg.}$$

Общий вес активного железа

$$G_{Fe} = (G_{Fe})_a + (G_{Fe})_r = 166 + 35,4 + 130 \approx 332 \text{ kg.}$$

Общий вес активной меди

$$G_{Cu} = (G_{Cu})_a + (G_{Cu})_r = 52,8 + 49,5 \approx 103 \text{ kg.}$$

Полный вес активного материала

$$G_{ak} = G_{Fe} + G_{Cu} = 332 + 103 \approx 435 \text{ kg.}$$

Полный вес машины

$$G_A = G_S + G_R = 255 + 350 \approx 605 \text{ kg.}$$

Коэффициент конструктивного совершенства

$$K = \frac{G_{ak}}{G_A} = \frac{435}{530} \approx 0,82.$$

Вес на 1 kW

$$g_{Cu} = \frac{G_{Cu}}{P} = \frac{103}{100} \approx 1,03 \text{ kg/kW,}$$

$$g_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P} = \frac{332}{100} \approx 3,32 \text{ kg/kW,}$$

$$g_{ak} = \frac{G_{ak}}{P} = \frac{435}{100} \approx 4,35 \text{ kg/kW,}$$

$$g_A = \frac{G_A}{P} = \frac{605}{100} \approx 6,05 \text{ kg/kW.}$$

Для расчета вала будем исходить из силы, обусловленной весом

$$G = G_R - 0,5 \cdot G_n + G_0.$$

Сила одностороннего магнитного притяжения

$$G_0 = a_1 \cdot \pi \cdot D \cdot l_0 \left(\frac{B_l}{5000} \right)^2 \cdot \frac{f_n}{\delta}.$$

Выбирая

$$f_n = 0,1 \cdot \delta = 0,1 \cdot 0,08 = 0,008 \text{ cm,}$$

найдем

$$G_0 = 0,712 \cdot \pi \cdot 48 \cdot 20,7 \left(\frac{6300}{5000} \right)^2 \cdot \frac{0,008}{0,08} \approx 350 \text{ kg.}$$

Тогда

$$G = 350 - 0,5 \cdot 140 + 350 = 630 \text{ kg.}$$

Максимальный крутящий момент

$$M_{d \max} \approx 2 \cdot M_{dn} \approx 2 \cdot 102 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P}{n} 10^2 = 2 \cdot 102 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{100}{1000} \cdot 10^2 = 19500 \text{ cmkg.}$$

Максимальный изгибающий момент

$$M_b \max = \frac{a \cdot b}{l} \cdot G = \frac{45 \cdot 30}{75} \cdot 630 = 11350 \text{ cmkg.}$$

Максимальный расчетный момент

$$M_{i \max} = 0,35 \cdot M_{b \max} + 0,65 \sqrt{M_{b \max}^2 + M_{d \max}^2} = \\ = 0,35 \cdot 11\,350 + 0,65 \sqrt{11\,350^2 + 19\,500^2} = 18\,620 \text{ cmkg}$$

Действующее на вал расчетное усилие

$$G_i = M_{i \max} \cdot \frac{l}{a \cdot b} = 18\,620 \cdot \frac{75}{45 \cdot 30} = 1\,035 \text{ kg.}$$

Тогда диаметр вала

$$d_n = \sqrt[4]{\frac{G_i \cdot a^2 \cdot l^2}{1,1 \cdot 10^5 \cdot l \cdot f_n}} = \sqrt[4]{\frac{1\,035 \cdot 45^2 \cdot 30^2}{1,1 \cdot 10^5 \cdot 75 \cdot 0,008}} = 13 \text{ cm.}$$

т.е. точно совпадает с ранее найденной величиной.

Проверим еще диаметр и длину цапфы.

Расчетный изгибающий момент для правой цапфы

$$M_i = 0,65 \cdot M_{d \max} = 0,65 \cdot 19\,500 \approx 12\,700 \text{ cmkg.}$$

Диаметр правой цапфы

$$d_{s1} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_i}{k_b}}.$$

Принимая $k_b = 500 \text{ kg/cm}^2$, найдем

$$d_{s1} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 12\,700}{500}} \approx 6,3 \text{ cm.}$$

Длина цапфы

$$l_{s1} \geq \frac{\pi \cdot G_{s1}}{180} \cdot \frac{n}{1\,000}.$$

Так как

$$G_{s1} = \frac{a}{l} \cdot G_i = \frac{45}{75} \cdot 1\,035 = 621 \text{ kg,}$$

то

$$l_{s1} \geq \frac{\pi \cdot 621}{181} \cdot \frac{1\,000}{1\,000} = 10,8 \text{ cm.}$$

Удельное давление на цапфу

$$p_{s1} = \frac{G_{s1}}{d_{s1} \cdot l_{s1}} = \frac{621}{6,3 \cdot 10,8} = 8,35 \text{ kg/cm}^2.$$

Тогда при

$$p_{s1} = p_{s2} = 8,35 \text{ kg/cm}^2$$

диаметр левой цапфы

$$d_{s2} = \sqrt[4]{\frac{5 \cdot G_{s2}}{k_b \cdot p_{s2}}}.$$

Так как

$$G_{s2} = \frac{b}{l} \cdot G_i = \frac{30}{75} \cdot 1\,035 = 414 \text{ kg,}$$

то

$$d_{s2} = \sqrt[4]{\frac{5 \cdot 414}{500 \cdot 8,35}} = 0,84 \text{ cm.}$$

Длина левой цапфы

$$l_{s2} = d_{s2} \sqrt{\frac{0,2 \cdot k_b}{p_{s2}}} = 0,84 \sqrt{\frac{0,2 \cdot 500}{8,35}} \approx 3 \text{ cm.}$$

Найденные здесь значения с точки зрения величины p_s слишком малы. Ранее установленные значения

$$d_{s1} = d_{s2} = 10 \text{ см} \text{ и } l_{s1} = l_{s2} = 25 \text{ см}$$

дают

$$p_{s1} = \frac{G_{s1}}{d_{s1} \cdot l_{s1}} = \frac{621}{10 \cdot 25} = 2,48 \text{ кг/см}^2;$$

$$p_{s2} = \frac{G_{s2}}{d_{s2} \cdot l_{s2}} = \frac{414}{10 \cdot 25} = 1,66 \text{ кг/см}^2,$$

поэтому на них и останавливаемся.

По найденным значениям

$$I_k = 108 \text{ А; } \cos \varphi_k = 0,214; \quad I_o = 6,45 \text{ А; } \cos \varphi_o = 0,105$$

строим диаграмму Heyland'a (фиг. 104), из которой легко получаем следующие значения при полной нагрузке. Для мотора $P = 100 \text{ кВт}$ эта диаграмма дает достаточно точные результаты, лишь незначительно отличающиеся от данных точной диаграммы:

статорный ток

$$I_1 = 23,6 \text{ А,}$$

потребляемая мощность

$$P_s = 109,2 \text{ кВт,}$$

вращающий момент

$$M = 100,5 \text{ кгм,}$$

полезная мощность

$$P = 100 \text{ кВт,}$$

скольжение

$$s = 0,0277 = 2,77\%,$$

коэффициент полезного действия

$$\eta = 92\%,$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi = 0,893.$$

На фиг. 105 построены рабочие кривые в функции полезной мощности по диаграмме Оссаппа-Сумес'а.

Для расчета пускового реостата примем, что

$$I'_{\max} = 1,5 \cdot I_1 = 1,5 \cdot 23,6 = 35,4 \text{ А,}$$

$$I'_{\min} = I_1 = 23,6 \text{ А.}$$

По диаграмме фиг. 104

$$s_{\max} = 0,0433; \quad s_{\min} = 0,0277.$$

Скольжение на 1-й ступени

$$s_1 = \frac{s_{\min}}{s_{\max}} = \frac{0,0277}{0,0433} = 0,64.$$

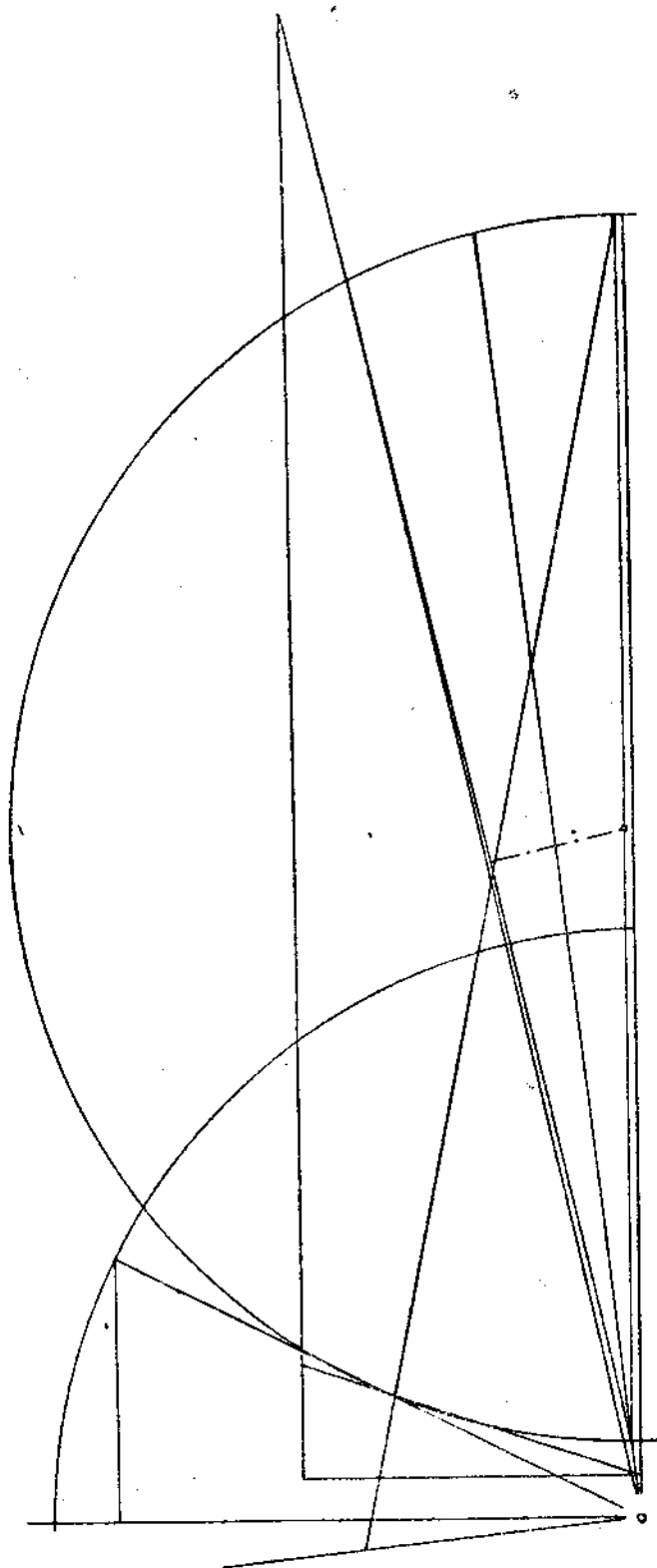
Число ступеней

$$x = \frac{\lg s_{\max}}{\lg s_1} = \frac{\lg 0,0433}{\lg 0,64} = 7,04.$$

Округляем до величины $x = 7$. Тогда

$$\lg s_1 = \frac{\lg s_{\max}}{7} = \frac{\lg 0,0433}{7} = \lg 0,6385,$$

$$s_{\min} = s_1 \cdot s_{\max} = 0,6385 \cdot 0,0433 = 0,02765.$$



Фиг. 104.

Этому скольжению по диаграмме соответствует ток

$$I'_{\min} = 23,4 \text{ A.}$$

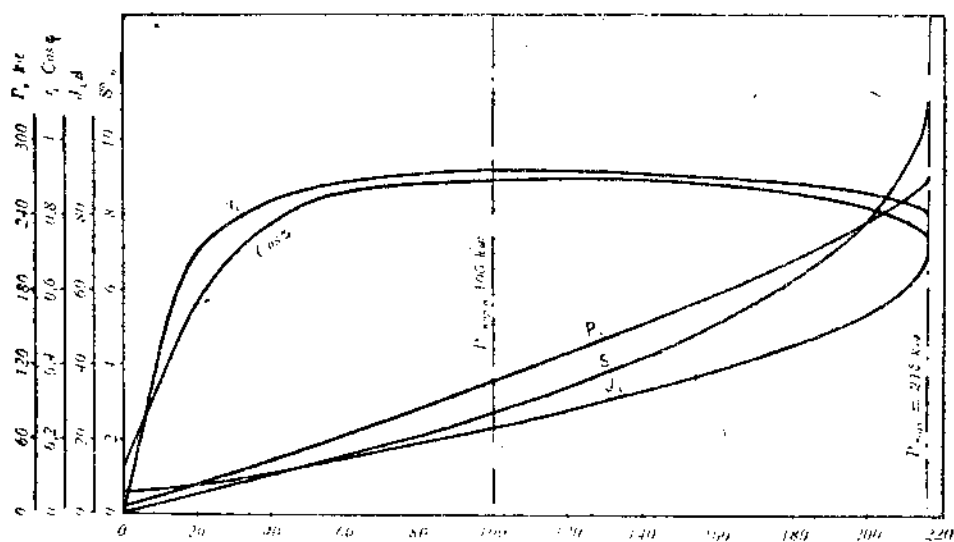
Полное сопротивление

$$R_0 = \frac{r_a}{s_{\max}} = \frac{0,017}{0,0433} = 0,392 \Omega.$$

Сопротивления отдельных ступеней:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= R_0 (1 - s_1) = 0,392 (1 - 0,6385) = 0,1417 \Omega \\ \rho_2 &= \rho_1 \cdot s_1 = 0,1417 \cdot 0,6385 = 0,0905 \Omega \\ \rho_3 &= \rho_2 \cdot s_1 = 0,0905 \cdot 0,6385 = 0,0578 \Omega \\ \rho_4 &= \rho_3 \cdot s_1 = 0,0578 \cdot 0,6385 = 0,0370 \Omega \\ \rho_5 &= \rho_4 \cdot s_1 = 0,0370 \cdot 0,6385 = 0,0235 \Omega \\ \rho_6 &= \rho_5 \cdot s_1 = 0,0235 \cdot 0,6385 = 0,0151 \Omega \\ \rho_7 &= \rho_6 \cdot s_1 = 0,0151 \cdot 0,6385 = 0,0096 \Omega \\ r_a &= 0,0170 \Omega \end{aligned}$$

$$R_0 \approx 0,3922 \Omega$$



Фиг. 105.

Число добавочных ступеней берем

$$y = 3.$$

По диаграмме, току

$$\frac{1}{k} \cdot I'_{\max} = \frac{1}{4} \cdot 35,4 = 8,83 \text{ A}$$

соответствует скольжению

$$s_y = 0,0091.$$

Сопротивление

$$R_y = \frac{r_a}{s_y} = \frac{0,017}{0,0091} = 1,87 \Omega.$$

Добавочное сопротивление

$$R_d = R_y - R_0 = 1,87 - 0,392 = 1,478 \Omega$$

2. Однофазный двигатель, $P = 5 \text{ kW}$, $E = 210 \text{ V}$, $n_s = 1500 \text{ об/мин}$. Пусковое приспособление.

Двигатель открытого типа снабжен ременным шкивом.

Обмотку ротора возьмем трехфазную, соединенную в звезду, т.-е. $m_s = 3$.

Далее

$$E = E_1 = 210 \text{ V}.$$

Пользуясь данными гл. I, устанавливаем следующие величины:
число пар полюсов

$$p = \frac{3000}{n_s} = \frac{3000}{1500} = 2,$$

коэффициент полезного действия

$$\eta = 0,79.$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi = 0,77.$$

По своим размерам наш двигатель эквивалентен трехфазному двигателю мощностью

$$P_{\text{III}} = 1,6 \cdot P_I = 1,6 \cdot 5 = 8 \text{ kW}.$$

Поэтому, согласно гл. I, 7 и 8, мы выбираем
линейную нагрузку

$$AS = 200,$$

индукцию в воздушном промежутке

$$B_l = 6400.$$

Подводимая к двигателю мощность

$$P_s = \frac{P}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{5}{0,79 \cdot 0,77} = 8,23 \text{ kVA}.$$

Сила тока в статоре

$$I_1 = \frac{P_s \cdot 10^3}{E_1} = \frac{8,23 \cdot 10^3}{210} = 39,2 \text{ A}.$$

Коэффициент использования

$$C = 1,161 \cdot AS \cdot B_l \cdot 10^{-12} = 1,161 \cdot 200 \cdot 6400 \cdot 10^{-12} = 14,88 \cdot 10^{-7}.$$

Тогда

$$D^2 l_i = \frac{P_s}{C \cdot n_s \cdot f_1} = \frac{8,23 \cdot 10^7}{14,88 \cdot 1500 \cdot 0,83} = 4450.$$

Принимая

$$\frac{l_i}{D} = 0,7$$

по кривым фиг. 3 для мощности в 8,0 kW, найдем

$$D \approx 19 \text{ см}, \quad l_i \approx 13 \text{ см},$$

что дает

$$D^2 l_i = 4700.$$

Так как эта величина почти равна полученной нами выше, то мы окончательно и остановимся на величинах

$$D = 19 \text{ см}; \quad \tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 19}{4} = 14,9 \text{ см};$$

$$l_i = 13 \text{ см}; \quad v = 14,9 \text{ м/сек}.$$

Величина воздушного промежутка, по уравнению (53),

$$\delta = 0,02 \left(1 + \frac{\sqrt{0,5 \cdot D \cdot l_1}}{10} \right) = 0,02 \left(1 + \frac{\sqrt{0,5 \cdot 19 \cdot 13}}{10} \right) = 0,042 \text{ см.}$$

Принимаем ближайший нормальный размер

$$\delta = 0,04 \text{ см.}$$

Диаметр ротора

$$D' = D - 2\delta = 19 - 2 \cdot 0,04 = 18,92 \text{ см.}$$

В статоре и роторе устраиваем по одному охлаждающему каналу, шириной в 1 см, т.-е.

$$b = 1; \quad L = 1 \text{ см.}$$

Тогда полная длина сердечника

$$\begin{aligned} l &= l_1 + bL - 1,46(b+1) \cdot \delta \cdot \lg \left(1 + \frac{\pi L}{2\delta} \right) = \\ &= 13 + 1 \cdot 1 - 1,46(1+1) \cdot 0,04 \cdot \lg \left(1 + \frac{\pi \cdot 1}{2 \cdot 0,04} \right) = 13,8 \text{ см.} \end{aligned}$$

Число витков статора (для рабочей обмотки)

$$w_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot AS}{2 \cdot m_1 \cdot l_1} = \frac{\pi \cdot 19 \cdot 200}{2 \cdot 1 \cdot 39,2} \approx 152.$$

Полное число впадин на полюс возьмем

$$Q_1 = 12,$$

из которых

$$q_1 = \frac{2}{3} \cdot Q_1 = \frac{2}{3} \cdot 12 = 8$$

заполнены рабочей обмоткой, а

$$q_1' = 4$$

заполнены пусковой обмоткой.

Число проводников во впадине

$$n_{*1} = \frac{w_1}{p \cdot q_1} = \frac{152}{2 \cdot 8} = 9,5.$$

Принимаем

$$n_{*1} = 9 \quad \text{и} \quad w_1 = n_{*1} \cdot p \cdot q_1 = 9 \cdot 2 \cdot 8 = 144.$$

Тогда

$$AS = \frac{w_1 \cdot 2 \cdot m_1 \cdot l_1}{\pi \cdot D} = \frac{144 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 39,2}{\pi \cdot 19} \approx 190.$$

Полное число впадин статора

$$u_1 = 2 \cdot m_1 \cdot p \cdot Q_1 = 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 12 = 48,$$

из них

$$u_1' = \frac{2}{3} \cdot 48 = 32$$

заполнены рабочей обмоткой.

Обмотку выполняем по фиг. 18. Схема обмотки показана на фиг. 106, при чем пунктиром обозначена вспомогательная (пусковая) фаза.

Шаг зубцов на поверхности статора

$$t_{\text{з. ст.}}' = \frac{\pi D}{u_1} = \frac{\pi \cdot 19}{48} = 1,24 \text{ см.}$$

Проверка на объем тока дает

$$A_n = \alpha \cdot t'_{\min} \cdot AS = 1,5 \cdot 1,24 \cdot 190 = 364 \text{ (допустимо } 400 \div 700).$$

Сечение проводника возьмем равным (по германским нормам)

$$q_s = 8,042 \text{ mm}^2,$$

что дает плотность тока

$$\Delta_1 = \frac{I_1}{q_s} = \frac{39,2}{8,042} = 4,9 \text{ A/mm}^2,$$

не выходящую из нормальных пределов.

Диаметр голого проводника.

$$d = 3,2 \text{ mm},$$

а с изоляцией (ВВ по германским нормам)

$$d_1 = 3,5 \text{ mm}.$$

Толщину прессшпановой изоляции впадины берем равной

$$a_n = 0,4 + \frac{E}{1000} = 0,4 + \frac{210}{1000} \approx 0,6 \text{ mm}.$$

Расположение проводников и размеры впадины представлены на фиг. 107.

Ширина впадины

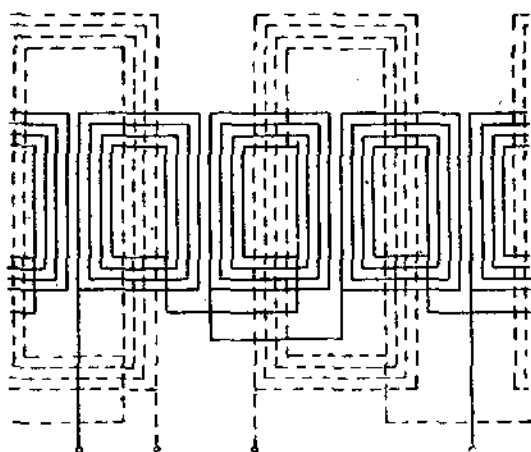
$$b_{n1} = 2 \cdot 0,6 + 3,5 + 3,5 \cdot \sin 60^\circ + 0,17 = 7,9 \text{ mm}$$

(здесь 0,17 mm — запас для облегчения вкладывания обмотки).

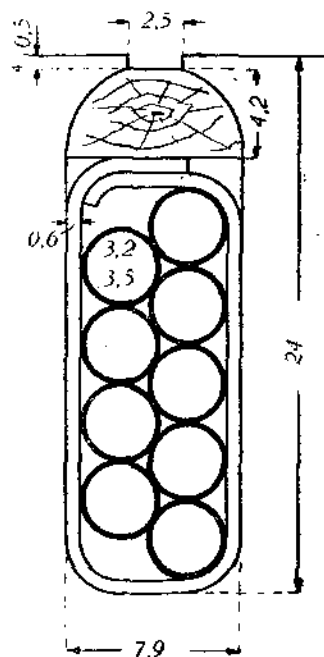
Высота впадины

$$h_{n1} = 3 \cdot 0,6 + 5 \cdot 3,5 + 4,2 + 0,5 = 24 \text{ mm}$$

(здесь 4,2 mm — высота клина).



Фиг. 106.



Фиг. 107.

Отношение

$$h_{n1} : b_{n1} = \frac{24}{7,9} = 3,04 < 4.$$

Наименьшая ширина зубца

$$Z'_{\min} = t'_{\min} - b_{n1} = 1,24 - 0,79 = 0,45 \text{ cm}.$$

Максимальная индукция

$$B_{2\max}' = \frac{t_{2\min}' \cdot I_1 \cdot B_1}{Z_{\min}' (t - bZ) \cdot 0,9} = \frac{1,24 \cdot 13 \cdot 6400}{0,45 \cdot (13,8 - 1 \cdot 1) \cdot 0,9} = 19\,900 < 20\,000.$$

В роторе возьмем число впадин на полюс и фазу

$$q_2 = 3.$$

Выберем стержневую двухслойную обмотку с удлинением перехода. Тогда

$$n_{\kappa 2} = 2.$$

Число витков роторной обмотки

$$w_2 = n_{\kappa 2} \cdot p \cdot q_2 = 2 \cdot 2 \cdot 3 = 12.$$

Число впадин ротора

$$u_2 = 2 \cdot q_2 \cdot m_2 \cdot p = 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 = 36.$$

Максимальное напряжение между двумя кольцами

$$E_{r\max} = E \frac{2w_1}{w_1} = 210 \cdot \frac{2 \cdot 12}{144} = 35 \text{ В},$$

что вполне допустимо.

Согласно уравнению (50) обмотка будет характеризоваться следующими данными (принимая $A = 1$).

$$y_1 = 3q_2 = 3 \cdot 3 = 9; \quad y_2 = 3q_2 \text{ до } 3q_2 + 1 = 3 \cdot 3 \text{ до } 3 \cdot 3 + 1 = 9 \text{ до } 10.$$

Шаг	$1_{\text{в}} \xrightarrow{3}$	$10_{\text{н}} \xrightarrow{\text{п}}$	$19_{\text{в}}$
Начала фаз	$1_{\text{в}}$	$25_{\text{в}}$	$13_{\text{в}}$
Концы фаз	$10_{\text{в}}$	$34_{\text{в}}$	$22_{\text{в}}$
Поворотные соединения . .	$30_{\text{н}} \text{ --- } 3_{\text{н}}$	$18_{\text{н}} \text{ --- } 27_{\text{н}}$	$6_{\text{н}} \text{ --- } 15_{\text{н}}$

Например, для I фазы схема обмотки будет

$$\begin{aligned} & 1_{\text{в}} \xrightarrow{3} 10_{\text{н}} \xrightarrow{\text{п}} 19_{\text{в}} \xrightarrow{3} 28_{\text{н}} \xrightarrow{\text{п}} 2_{\text{в}} \\ & 2_{\text{в}} \text{ --- } 11_{\text{н}} \text{ --- } 20_{\text{в}} \text{ --- } 29_{\text{н}} \text{ --- } 3_{\text{в}} \\ & 3_{\text{в}} \text{ --- } 12_{\text{н}} \text{ --- } 21_{\text{в}} \text{ --- } \underline{30_{\text{н}} \text{ --- } 3_{\text{н}}} \\ & 3_{\text{н}} \text{ --- } 30_{\text{н}} \text{ --- } 21_{\text{н}} \text{ --- } 12_{\text{н}} \text{ --- } 2_{\text{н}} \\ & 2_{\text{н}} \text{ --- } 29_{\text{н}} \text{ --- } 20_{\text{н}} \text{ --- } 11_{\text{н}} \text{ --- } 1_{\text{н}} \\ & 1_{\text{н}} \text{ --- } 28_{\text{н}} \text{ --- } 19_{\text{н}} \text{ --- } 10_{\text{н}} \end{aligned}$$

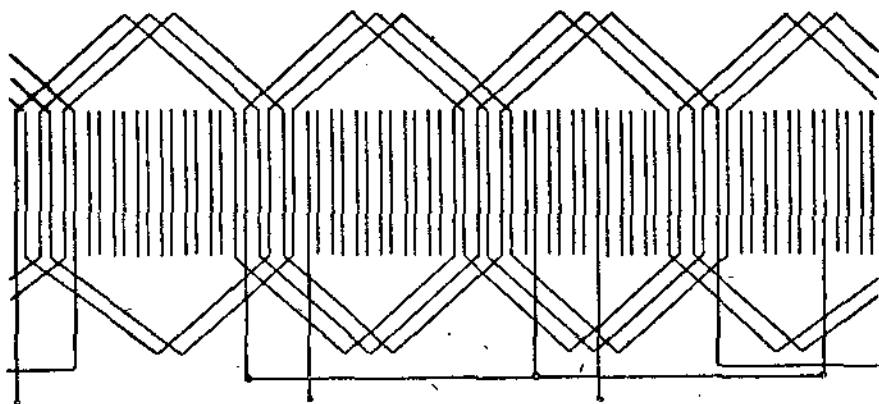
Схема обмотки ротора показана на фиг. 108, при чем для ясности вычерчена полностью только фаза I, а для двух других показаны только начала и концы (соединенные в звезду).

Так как, согласно гл. II, 2, А, I, обмоточные коэффициенты

$$f_1 = 0,829 \text{ и } f_2 = 0,96,$$

то сила тока в роторе

$$I_2 = 0,9 \cdot I_1 \frac{f_1 \cdot w_1}{2 \cdot f_2 \cdot w_2} = 0,9 \cdot 39,2 \frac{0,829 \cdot 144}{2 \cdot 0,96 \cdot 12} = 183 \text{ А.}$$



Фиг. 108.

Для ротора возьмем прямоугольный проводник размерами $6 \times 7 \text{ мм}$, а с изоляцией (ВВ по германским нормам) — $6,6 \times 7,6 \text{ мм}$. Тогда плотность тока

$$\Delta_2 = \frac{I_2}{q_r} = \frac{183}{42} = 4,35 \text{ А/мм}^2,$$

что вполне допустимо.

Толщина пресшпановой изоляции впадины

$$a_n = 0,4 + \frac{E_s}{10 \cdot 0} = 0,4 + \frac{58,4}{\sqrt{3} \cdot 1000} = 0,434 \text{ мм} \approx 0,5 \text{ мм}.$$

Расположение проводников и размеры впадины показаны на фиг. 109.

Ширина впадины

$$b_{n2} = 6,6 + 2 \cdot 0,5 = 7,6 \text{ мм}.$$

Высота впадины

$$h_{n2} = 2 \cdot 7,6 + 3 \cdot 0,5 + 2,3 = 19 \text{ мм}$$

(здесь $2,3 \text{ мм}$ — толщина клина).

Отношение

$$\frac{h_{n2}}{b_{n2}} = \frac{19}{7,6} = 2,5 < 4.$$

Отношение

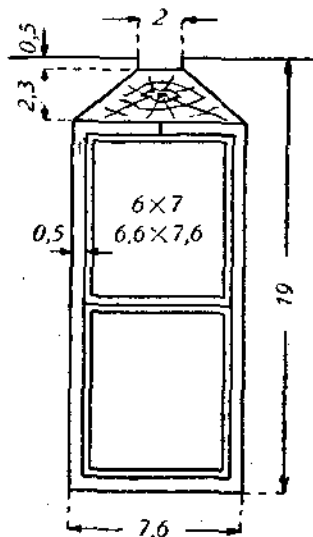
$$\frac{h_{n2}}{h_{n1}} = \frac{19}{24} = 0,79.$$

Зубцовый шаг по окружности, проходящей через основания зубцов

$$t''_{\text{min}} = \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_{n2})}{u_2} = \frac{\pi(19 - 2 \cdot 0,04 - 2 \cdot 1,9)}{36} = 1,37 \text{ см}.$$

Наименьшая ширина зубца

$$Z''_{\text{min}} = t''_{\text{min}} - b_{n2} = 1,37 - 0,76 = 0,61 \text{ см} > 0,3 \text{ см}.$$



Фиг. 109.

Зубцовый шаг на поверхности ротора

$$t_z''_{\max} = \frac{\pi(D-2\delta)}{z_s} = \frac{\pi(19-2 \cdot 0,04)}{36} = 1,65 \text{ см.}$$

Максимальная индукция

$$B_z''_{\max} = \frac{t_z''_{\max} \cdot I_s \cdot B_k}{0,9(l-bL) \cdot Z''_{\min}} = \frac{1,65 \cdot 13 \cdot 6400}{0,9(13,8-1 \cdot 1) \cdot 0,61} = 19550 < 22000.$$

Длина половины витка обмотки статора

$$l_{s1} \approx l + 1,4\tau + 3 = 13,8 + 1,4 \cdot 14,9 + 3 \approx 38 \text{ см} = 0,38 \text{ м.}$$

Длина половины витка обмотки ротора

$$l_{r1} \approx l + 1,2\tau + 2 = 13,8 + 1,2 \cdot 14,9 + 2 \approx 34 \text{ см} = 0,34 \text{ м.}$$

Для статора коэффициент

$$\gamma_s = 1 + \frac{x_s - 0,2}{15,25(1+\lambda)} \cdot \alpha^2 = 1 + \frac{5^2 - 0,2}{15,25 \left(1 + \frac{13,8}{24,2}\right)} \cdot 0,32^2 = 1,011.$$

Для ротора коэффициент

$$\gamma_r = 1 + \frac{x_r^2 - 0,2}{9(1+\lambda)} \cdot h^2 = 1 + \frac{2 - 0,2}{9 \left(1 + \frac{13,8}{20,2}\right)} \cdot 0,7^2 = 1,06.$$

Тогда сопротивление статора

$$r_1 = \gamma_s \cdot \frac{2w_1}{a_1} \cdot \frac{l_{s1}}{48 \cdot q_s} = 1,011 \cdot \frac{2 \cdot 144}{1} \cdot \frac{0,38}{48 \cdot 8,042} = 0,287 \text{ }\Omega.$$

Сопротивление одной фазы ротора

$$r_2 = \gamma_r \cdot \frac{2w_2}{a_2} \cdot \frac{l_{r1}}{48 \cdot q_r} = 1,06 \cdot \frac{2 \cdot 12}{1} \cdot \frac{0,34}{48 \cdot 42} = 0,0043 \text{ }\Omega,$$

а приведенное к статору

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{w_1^2 \cdot f_1^2}{4w_2^2 \cdot f_2^2} = 0,0043 \cdot \frac{144^2 \cdot 0,829^2}{4 \cdot 12^2 \cdot 0,96^2} = 0,115 \text{ }\Omega.$$

Сопротивление короткого замыкания

$$r_k = r_1 + 2 \cdot r_2' = 0,287 + 2 \cdot 0,115 = 0,517 \text{ }\Omega.$$

Контактные кольца делаем шириной 25 мм каждое и выбираем щетки марки „МУ¹“) размерами 30 × 35 мм. Тогда плотность тока при переходе с щетки на кольцо, если на каждом кольце имеется 1 щетка

$$\Delta_b = \frac{I_s}{F_b} = \frac{183}{3 \cdot 3,5} = 17,4 \text{ А/см}^2,$$

что вполне допустимо.

Диаметр колец определяем по линейной скорости

$$v_k \approx 10 \text{ м/сек.}$$

$$D_k = \frac{60 \cdot v_k}{\pi \cdot n} \cdot 10^2 = \frac{60 \cdot 10}{\pi \cdot 1500} \cdot 10^2 \approx 12,8 \text{ см.}$$

Окончательно берем по германскому стандарту

$$D_k = 125 \text{ мм.}$$

¹) По проекту Общесоюзного стандарта.

Зубцовый шаг на поверхности ротора

$$t_{z \max}'' = \frac{\pi(D-2\delta)}{u_z} = \frac{\pi(19-2 \cdot 0,04)}{36} = 1,65 \text{ см.}$$

Максимальная индукция

$$B_{z \max}'' = \frac{t_{z \max}'' \cdot l_t \cdot B_L}{0,9(l-\delta L) \cdot Z_{\min}''} = \frac{1,65 \cdot 13 \cdot 6400}{0,9(13,8-1 \cdot 1) \cdot 0,61} = 19550 < 22000.$$

Длина половины витка обмотки статора

$$l_{a_1} \approx l + 1,4\tau + 3 = 13,8 + 1,4 \cdot 14,9 + 3 \approx 38 \text{ см} = 0,38 \text{ м.}$$

Длина половины витка обмотки ротора

$$l_{a_2} \approx l + 1,2\tau + 2 = 13,8 + 1,2 \cdot 14,9 + 2 \approx 34 \text{ см} = 0,34 \text{ м.}$$

Для статора коэффициент

$$\gamma_s = 1 + \frac{x_s - 0,2}{15,25(1+\lambda)} d^2 = 1 + \frac{5^2 - 0,2}{15,25 \left(1 + \frac{13,8}{24,2}\right)} \cdot 0,32^2 = 1,011.$$

Для ротора коэффициент

$$\gamma_r = 1 + \frac{x^2 - 0,2}{9(1+\lambda)} \cdot h^2 = 1 + \frac{2 - 0,2}{9 \left(1 + \frac{13,8}{20,2}\right)} \cdot 0,7^2 = 1,06.$$

Тогда сопротивление статора

$$r_1 = \gamma_s \cdot \frac{2w_1}{a_1} \cdot \frac{l_{a1}}{48 \cdot q_s} = 1,011 \cdot \frac{2 \cdot 144}{1} \cdot \frac{0,38}{48 \cdot 8,042} = 0,287 \Omega.$$

Сопротивление одной фазы ротора

$$r_2 = \gamma_r \cdot \frac{2w_2}{a_2} \cdot \frac{l_{a2}}{48 \cdot q_r} = 1,06 \cdot \frac{2 \cdot 12}{1} \cdot \frac{0,34}{48 \cdot 42} = 0,0043 \Omega.$$

а приведенное к статору

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{w_1^2 \cdot f_2^2}{4w_2^2 \cdot f_1^2} = 0,0043 \cdot \frac{144^2 \cdot 0,829^2}{4 \cdot 12^2 \cdot 0,96^2} = 0,115 \Omega.$$

Сопротивление короткого замыкания

$$r_k = r_1 + 2 \cdot r_2' = 0,287 + 2 \cdot 0,115 = 0,517 \Omega.$$

Контактные кольца делаем шириной 25 *mm* каждое и выбираем щетки марки „МУ¹“) размерами 30 × 35 *mm*. Тогда плотность тока при переходе со щетки на кольцо, если на каждом кольце имеется 1 щетка

$$\Delta_b = \frac{I_2}{F_b} = \frac{183}{3 \cdot 3,5} = 17,4 \text{ А/см}^2,$$

что вполне допустимо.

Диаметр колец определяем по линейной скорости

$$v_k \approx 10 \text{ м/сек.}$$

$$D_k = \frac{60 \cdot v_k}{\pi \cdot n} \cdot 10^2 = \frac{60 \cdot 10}{\pi \cdot 1500} \cdot 10^2 \approx 12,8 \text{ см.}$$

Окончательно берем по германскому стандарту

$$D_k = 125 \text{ mm.}$$

¹) По проекту Общесоюзного стандарта.

Принимая для нашего двигателя (гл. III, 1)

$$\epsilon = 0,05,$$

найдем ЭДС статора

$$E_1' = E_1 (1 - \epsilon) = 210 (1 - 0,05) \approx 200 \text{ V.}$$

Магнитный поток одного полюса

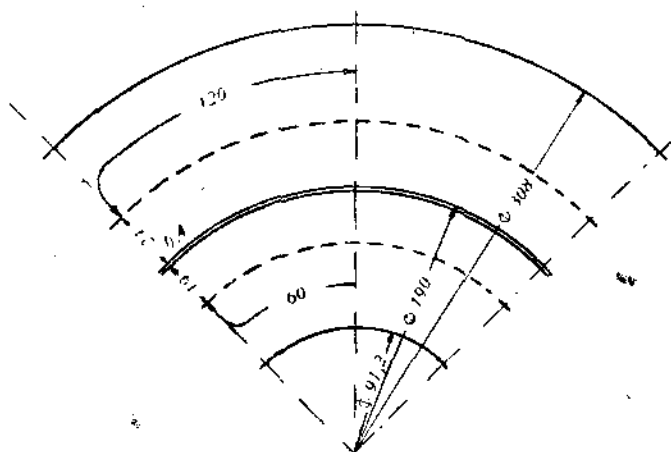
$$\Phi = \frac{E_1' \cdot 10^8}{\pi \sqrt{2} \cdot f \cdot w_1 \cdot f_1} = \frac{200 \cdot 10^8}{\pi \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 144 \cdot 0,829} = 0,754 \cdot 10^8.$$

Подсчитаем теперь теоретический воздушный промежуток

$$\delta' = k_1 \cdot \delta.$$

Величина

$$v = \frac{a_{4s} + a_{4r}}{\delta} = \frac{0,25 + 0,2}{0,04} = 11,25.$$



Фиг. 110.

По кривой фиг. 42

$$X = 3,12.$$

Далее

$$\delta_s = \frac{a_{4s} \cdot \delta}{a_{4s} + a_{4r}} = 0,0222;$$

$$\delta_r = \frac{a_{4r} \cdot \delta}{a_{4s} + a_{4r}} = 0,0178.$$

$$k_s = \frac{t_s' \min}{t_s' \min - a_{4s} + X \cdot \delta_s} = \frac{1,24}{1,24 - 0,25 + 3,12 \cdot 0,0222} = 1,17,$$

$$k_r = \frac{t_s'' \max}{t_s'' \max - a_{4r} + X \cdot \delta_r} = \frac{1,65}{1,65 - 0,2 + 3,12 \cdot 0,0178} = 1,095.$$

Коэффициент

$$k_1 = \frac{\delta_s \cdot k_s + \delta_r \cdot k_r}{\delta} = \frac{0,0222 \cdot 1,17 + 0,0178 \cdot 1,095}{0,04} = 1,11.$$

Теоретический воздушный промежуток

$$\delta' = k_1 \cdot \delta = 1,11 \cdot 0,04 = 0,0444 \text{ см.}$$

Длина чистого железа

$$l_0 = 0,9 (l - bL) = 0,9 (13,8 - 1 \cdot 1) = 11,5 \text{ см.}$$

Примем индукции

$$B_{a1} = 10\,000 \text{ и } B_{a2} = 11\,000,$$

тогда высота тела статора

$$h_s = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{a1} \cdot l_0} = \frac{0,754 \cdot 10^8}{2 \cdot 10\,000 \cdot 11,5} = 3,28 \text{ см} \approx 3,5 \text{ см}$$

и высота тела ротора

$$h_r = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{a2} \cdot l_0} = \frac{0,754 \cdot 10^8}{2 \cdot 11\,000 \cdot 11,5} \approx 3 \text{ см.}$$

Окончательно

$$B_{a1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_s \cdot l_0} = \frac{0,754 \cdot 10^8}{2 \cdot 3,5 \cdot 11,5} = 9\,360$$

$$B_{a2} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_r \cdot l_0} = \frac{0,754 \cdot 10^8}{2 \cdot 3 \cdot 11,5} = 10\,900$$

Начертив эскиз (фиг. 110), определяем длины:

$$\frac{1}{2} l_s = 12 \text{ см}; \quad \frac{1}{2} l_r = 6 \text{ см.}$$

При синусоидальном распределении индукции

$$B_l = \frac{\Phi}{0,637 \cdot \tau \cdot l_l} = \frac{0,754 \cdot 10^8}{0,637 \cdot 14,9 \cdot 13} = 6\,120.$$

Число ампер витков для воздуха

$$AW_l = 0,8 \cdot B_l \cdot \delta' = 0,8 \cdot 6\,120 \cdot 0,0444 \approx 218.$$

Определим теперь ампервитки для зубцов.

Статор.

$$l'_{s \min} = 1,24 \text{ см}; \quad Z_{\min} = 0,45 \text{ см.}$$

$$Z_{cp} = \frac{(D + h_{n1}) \pi}{u_1} - b_{n1} = \frac{(19 + 2,4) \pi}{48} - 0,79 = 0,61 \text{ см}$$

$$Z_{\max} = \frac{(D + 2h_{n1}) \pi}{u_1} - b_{n1} = \frac{(19 + 2 \cdot 2,4) \pi}{48} - 0,79 = 0,77 \text{ см.}$$

$$B_{st \max} = \frac{B_l \cdot l'_{s \min} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\min}} = \frac{6\,120 \cdot 1,24 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,45} = 19\,100$$

$$B_{st \text{ cp}} = \frac{B_l \cdot l'_{s \min} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{cp}} = \frac{6\,120 \cdot 1,24 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,61} = 14\,100$$

$$B_{st \min} = \frac{B_l \cdot l'_{s \min} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\max}} = \frac{6\,120 \cdot 1,24 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,77} = 11\,150.$$

Так как $B_{st \max} > 18\,000$, то определяем

$$k_3' = \frac{b_{n1} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\min}} = \frac{0,79 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,45} \approx 2.$$

Тогда по кривой фиг. 65

$$aw_{s \max} = 150,$$

а по кривым фиг. 66

$$aw_{s \text{ cp}} = 18; \quad aw_{s \min} = 5,7.$$

$$AW_{ss} = l_{ss} \cdot \frac{aw_{s \max} + 4 \cdot aw_{s \text{ cp}} + aw_{s \min}}{6} = 2,4 \cdot \frac{150 + 4 \cdot 18 + 5,7}{6} = 91.$$

Ротор.

$$l''_{s \max} = 1,65 \text{ cm}; \quad Z_{\min} = 0,61 \text{ cm}.$$

$$Z_{cp} = \frac{(D - 2\delta - h_{n2})\pi}{u_2} - b_{n2} = \frac{(19 - 2 \cdot 0,04 - 1,9)\pi}{36} - 0,76 = 0,75 \text{ cm}.$$

$$Z_{\max} = \frac{(D - 2\delta)\pi}{u_2} - b_{n2} = \frac{(19 - 2 \cdot 0,04)\pi}{36} - 0,76 = 0,89 \text{ cm}.$$

$$B_{st \max} = \frac{B_l \cdot t''_{s \max} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\min}} = \frac{6120 \cdot 1,65 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,61} = 18700$$

$$B_{st \text{cp}} = \frac{B_l \cdot t''_{s \max} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{cp}} = \frac{6120 \cdot 1,65 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,75} = 15250$$

$$B_{st \min} = \frac{B_l \cdot t''_{s \max} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\max}} = \frac{6120 \cdot 1,65 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,89} = 12800$$

$$k_s' = \frac{b_{n2} \cdot l_l}{l_0 \cdot Z_{\min}} = \frac{0,76 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,61} \approx 1,4.$$

По кривой фиг. 65

$$aw_{s \max} = 140.$$

По кривым фиг. 66

$$aw_{s \text{cp}} = 28; \quad aw_{s \min} = 11.$$

$$AW_{sr} = l_{sr} \cdot \frac{aw_{s \max} + 4aw_{s \text{cp}} + aw_{s \min}}{6} = 1,9 \cdot \frac{140 + 4 \cdot 28 + 11}{6} = 83.$$

Коэффициент

$$k_s = 1 + \frac{AW_{ss} + AW_{sr}}{AW_l} = 1 + \frac{91 + 83}{218} = 1,8.$$

По кривой I фиг. 67 этой величине соответствует значение

$$\alpha_l = 0,71.$$

Тогда истинное значение

$$B_l = \frac{\Phi}{\alpha_l \cdot \tau \cdot l_l} = \frac{0,754 \cdot 10^8}{0,71 \cdot 14,9 \cdot 13} = 5500,$$

$$AW_l = 0,8 \cdot 5500 \cdot 0,0444 = 196.$$

Статор.

$$B_{st \max} = \frac{5500 \cdot 1,24 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,45} = 16900;$$

$$B_{st \text{cp}} = \frac{5500 \cdot 1,24 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,61} = 12500;$$

$$B_{st \min} = \frac{5500 \cdot 1,24 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,77} = 9900.$$

По кривым фиг. 66

$$aw_{s \max} = 60; \quad aw_{s \text{cp}} = 9,5; \quad aw_{s \min} = 3,6;$$

$$AW_{ss} = 2,4 \cdot \frac{60 + 4 \cdot 9,5 + 3,6}{6} \approx 41.$$

Ротор.

$$B_{st \max} = \frac{5500 \cdot 1,65 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,61} = 16860;$$

$$B_{st \text{ ср}} = \frac{5500 \cdot 1,65 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,75} = 13700;$$

$$B_{st \min} = \frac{5500 \cdot 1,65 \cdot 13}{11,5 \cdot 0,89} = 11500.$$

По кривым фиг. 66

$$a\omega_{s \max} = 58; \quad a\omega_{\text{ср}} = 15; \quad a\omega_{s \min} = 6,5,$$

$$AW_{\text{ст}} = 1,9 \frac{58 + 4 \cdot 15 + 6,5}{6} \approx 40.$$

Коэффициент

$$k_s = 1 + \frac{41 + 40}{196} \approx 1,41,$$

чему по кривой II фиг. 67 соответствует

$$\alpha_i = 0,71,$$

т.-е. совпадение получилось полное.

Для тела статора ($B_{a1} = 9360$) по фиг. 66

$$a\omega_s \approx 3,$$

$$AW_s = 0,637 \cdot \frac{l_s}{2} \cdot a\omega_s = 0,637 \cdot 12 \cdot 3 \approx 25.$$

Для тела ротора ($B_{a2} = 10900$) по кривой фиг. 66

$$a\omega_r = 5,$$

$$AW_r = 0,637 \cdot \frac{l_r}{2} \cdot a\omega_r = 0,637 \cdot 6 \cdot 5 \approx 19.$$

Полное число ампервитков

$$AW_k = AW_l + AW_{ls} + AW_{lr} + AW_s + AW_r = 196 + 41 + 40 + 25 + 19 = 321.$$

Намагничивающий ток

$$I_\mu = \frac{1,11 \cdot p \cdot AW_k}{w_1 \cdot f_1} = \frac{1,11 \cdot 2 \cdot 321}{144 \cdot 0,829} = 5,97 \text{ A.}$$

Безваттная составляющая тока холостого хода

$$I_{01} \approx 1,95 \cdot I_\mu = 1,95 \cdot 5,97 \approx 11,7 \text{ A.}$$

Определим теперь индуктивное сопротивление обмоток.

Статор.

По уравнению (135)

$$\lambda_n = k_1 \cdot \frac{h_1}{3a} + \frac{h_2}{a} + 0,66 + \frac{h_4}{a_4},$$

где

$$k_1 = 0,9,$$

$$h_1 = 16,5 \text{ mm}; \quad h_2 = 1,45 \text{ mm}; \quad h_4 = 0,5 \text{ mm},$$

$$a = b_n = 7,9 \text{ mm}; \quad a_4 = 2,5 \text{ mm},$$

$$\lambda_n = 0,9 \frac{16,5}{3 \cdot 7,9} + \frac{1,45}{7,9} + 0,66 + \frac{0,5}{2,5} = 1,67.$$

$$x_{n1} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{I_1}{p} \cdot \frac{\lambda_n}{q_1'} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{144}{100} \right)^2 \cdot \frac{13}{2} \cdot \frac{1,67}{8} = 0,223 \Omega.$$

$$\lambda_k = \frac{[t_s''_{\max} - 0,75(a_{4s} + a_{4r})]^2}{6 \cdot t_s''_{\max} \cdot \delta} = \frac{[1,65 - 0,75(0,25 + 0,2)]^2}{6 \cdot 1,65 \cdot 0,04} = 4,34.$$

$$x_{p1} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{I_1}{p} \cdot \frac{\lambda_k}{q_1'} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{144}{100} \right)^2 \cdot \frac{13}{2} \cdot \frac{4,34}{8} = 0,58 \Omega.$$

$$x_{s1} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{I_s}{p} \cdot \lambda_s = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{144}{100} \right)^2 \cdot \frac{24,2}{2} \cdot 0,15 = 0,298 \Omega.$$

$$E_{d1} = 2,22 \cdot f \cdot z_1 (f_{11} - f_{12}) \cdot \Phi \cdot 10^{-8} =$$

$$= 2,22 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 144 (0,9643 - 0,9603) \cdot 0,754 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 0,965 \text{ V}.$$

$$x_{d1} = \frac{E_{d1}}{I_{01}} = \frac{0,965}{11,7} = 0,083 \Omega.$$

$$x_1 = x_{n1} + x_{p1} + x_{s1} + x_{d1} = 0,223 + 0,58 + 0,298 + 0,083 = 1,184 \Omega.$$

Ротор.

По уравнению (134)

$$\lambda_n' = \lambda_n = k_i \cdot \frac{h_1}{3a} + \frac{h_2}{a} + \frac{h_3}{a_3} + \frac{h_4}{a_4},$$

где

$$k_i = 0,9$$

$$h_1 = 2h_1' + h' = 2 \cdot 7 + 1,1 = 15,1 \text{ mm}; \quad h_2 = 0,8 \text{ mm};$$

$$h_3 = 2,3 \text{ mm}; \quad h_4 = 0,5 \text{ mm};$$

$$a = b_n = 7,6 \text{ mm}; \quad a_3 = \frac{a_4 + a}{2} = \frac{2 + 7,6}{2} = 4,8 \text{ mm}; \quad a_4 = 2 \text{ mm};$$

$$\lambda_n' = \lambda_n = 0,9 \cdot \frac{15,1}{3 \cdot 7,6} + \frac{0,8}{7,6} + \frac{2,3}{4,8} + \frac{0,5}{2} = 1,43.$$

$$x_{n2} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \cdot \frac{I_1}{p} \cdot \frac{\lambda_n}{q_2} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{12}{100} \right)^2 \cdot \frac{13}{2} \cdot \frac{1,43}{3} = 0,0035 \Omega.$$

$$\lambda_k = \frac{[t_s'_{\min} - 0,75(a_{4s} + a_{4r})]^2}{6 \cdot t_s'_{\min} \cdot \delta} = \frac{[1,24 - 0,75(0,25 + 0,2)]^2}{6 \cdot 1,24 \cdot 0,04} = 3,03.$$

$$x_{p2} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \cdot \frac{I_1}{p} \cdot \frac{\lambda_k}{q_2} \cdot \frac{1+g}{2} =$$

$$= 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{12}{100} \right)^2 \cdot \frac{13}{2} \cdot \frac{3,03}{3} \cdot \frac{1+0,5}{2} = 0,0056 \Omega.$$

$$x_{s2} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \cdot \frac{I_s}{p} \cdot \lambda_s = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{12}{100} \right)^2 \cdot \frac{20,2}{2} \cdot 0,25 = 0,0029 \Omega.$$

$$E_{d2} = 2,22 \cdot f \cdot z_2 (f_{22} - f_{21}) \cdot \Phi \cdot 10^{-8} =$$

$$= 2,22 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 12 (0,9583 - 0,9453) \cdot 0,754 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 0,26 \text{ V}.$$

$$x_{d2} = \frac{E_{d2}}{I_{01} \frac{f_1 w_1}{2 f_2 \cdot w_2}} = \frac{0,26}{11,7 \cdot \frac{0,829 \cdot 144}{2 \cdot 0,96 \cdot 12}} = 0,0053 \Omega.$$

$$x_2 = x_{n2} + x_{p2} + x_{s2} + x_{d2} = 0,0035 + 0,0056 + 0,0029 + 0,0043 = 0,0163 \Omega,$$

с приведенное к статору

$$x_2' = x_2 \frac{w_1^2 \cdot f_1^2}{4 w_2^2 \cdot f_2^2} = 0,0163 \frac{144^2 \cdot 0,829^2}{4 \cdot 12^2 \cdot 0,96^2} = 0,437 \Omega.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = x_1 + 2x_2' = 1,184 + 2 \cdot 0,437 = 2,058 \Omega.$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = \sqrt{0,517^2 + 2,058^2} = 2,12 \Omega.$$

Сила тока короткого замыкания

$$I_k = \frac{E_1}{z_k} = \frac{210}{2,12} = 99 \text{ A.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k} = \frac{0,517}{2,12} \approx 0,25.$$

Идеальный ток короткого замыкания

$$I_{k1} = \frac{E_1}{x_k} = \frac{210}{2,058} = 102 \text{ A.}$$

Вес статорного железа

$$\begin{aligned} G_{as} &= 24,5 \cdot l_0 \cdot h_s (D + 2h_{n1} + h_s) \cdot 10^{-3} = \\ &= 24,5 \cdot 11,5 \cdot 3,5 (19 + 2 \cdot 2,4 + 3,5) 10^{-3} = 24 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Вес статорных зубцов

$$\begin{aligned} G_{sz} &= 7,8 \cdot l_0 \cdot h_{n1} [(D + h_{n1}) \pi - u_1 \cdot b_{n1}] 10^{-3} = \\ &= 7,8 \cdot 11,5 \cdot 2,4 [(19 + 2,4) \pi - 48 \cdot 0,79] 10^{-3} = 6,3 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Потеря на гистерезис для тела статора

$$(W_h)_{as} = k_h \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{0,637 \cdot B_{a1}}{10\,000} \right)^2 \cdot G_{as}.$$

Для обыкновенного динамного железа толщиной 0,5 mm

$$\varepsilon = 4,4.$$

Принимая $k_h = 2,0$, получим

$$(W_h)_{as} = 2 \cdot 4,4 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{0,637 \cdot 9\,360}{10\,000} \right)^2 \cdot 24 \approx 38 \text{ W.}$$

Потеря на гистерезис для зубцов статора при $k_h = 1,2$

$$(W_h)_{sz} = k_h \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{100} \left(\frac{B_{sz \text{ ср}}}{10\,000} \right)^2 \cdot G_{sz} = 1,2 \cdot 4,4 \cdot \frac{50}{100} \left(\frac{12\,500}{10\,000} \right)^2 \cdot 6,3 \approx 27 \text{ W.}$$

Потеря на токи Фуко в теле статора

$$(W_f)_{as} = k_f \sigma_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{0,637 \cdot B_{a1}}{10\,000} \right)^2 \cdot G_{as}.$$

Для отношения

$$\frac{h_s}{\tau} = \frac{3,5}{14,9} = 0,235$$

по кривой фиг. 74

$$k_f = 1,1.$$

Так как $\sigma_f = 5,6$, то

$$(W_f)_{as} = 1,1 \cdot 5,6 \left(\frac{50}{100} \cdot \frac{0,637 \cdot 9\,360}{10\,000} \right)^2 \cdot 24 \approx 13 \text{ W.}$$

Потеря на токи Фуко для зубцов статора при $k_f = 1,5$

$$(W_f)_{st} = k_f \cdot \sigma_f \left(\frac{f}{100} \cdot \frac{B_{st\text{cp}}}{10000} \right)^2 \cdot G_{st} = 1,5 \cdot 5,6 \left(\frac{50}{100} \cdot \frac{12500}{10000} \right)^2 \cdot 6,3 \approx 21 \text{ W.}$$

Поверхностная потеря статора

$$(W_o)_{st} = \pi D (l - bL) \frac{t_s' \min - a_{4s}}{t_s' \min} \cdot \frac{1}{2} \cdot k_{os} \left(\frac{u_2 \cdot n_s}{10000} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{t_s'' \max \cdot \beta_2 \cdot k_{os} \cdot B_I}{1000} \right)^2 \cdot 10^{-4}$$

$$k_{os} = 2,7.$$

При

$$\frac{a_{4r}}{\delta} = \frac{0,2}{0,04} = 5$$

коэффициент

$$\beta_2 = 0,3143$$

$$k_{os} = \frac{t_s'' \max}{t_s'' \max + \delta - \frac{3}{4} a_{4r}} = \frac{1,65}{1,65 + 0,04 - \frac{3}{4} \cdot 0,2} = 1,07.$$

$$W_{os} = \pi \cdot 19 \cdot (13,8 - 1 \cdot 1) \frac{1,24 - 0,25}{1,24} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2,7 \left(\frac{36 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,65 \cdot 0,3143 \cdot 1,07 \cdot 5500}{1000} \right)^2 \cdot 10^{-4} \approx 8 \text{ W.}$$

Поверхностная потеря ротора

$$(W_o)_r = \pi (D - 2\delta) \cdot (l - bL) \frac{t_s'' \max - a_{4r}}{t_s'' \max} \cdot \frac{1}{2} \cdot k_{or} \left(\frac{u_1 \cdot n_r}{10000} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{t_s' \min \cdot \beta_1 \cdot k_{or} \cdot B_I}{1000} \right)^2 \cdot 10^{-4}$$

$$k_{or} = 2,7.$$

При

$$\frac{a_{4s}}{\delta} = \frac{0,25}{0,04} = 6,25$$

коэффициент

$$\beta_1 = 0,3471$$

$$k_{or} = \frac{t_s' \min}{t_s' \min + \delta - \frac{3}{4} \cdot a_{4s}} = \frac{1,24}{1,24 + 0,04 - \frac{3}{4} \cdot 0,25} = 1,135$$

$$(W_o)_r = \pi (19 - 2 \cdot 0,04) \cdot (13,8 - 1 \cdot 1) \frac{1,65 - 0,2}{1,65} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2,7 \left(\frac{48 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,24 \cdot 0,3471 \cdot 1,135 \cdot 5500}{1000} \right)^2 \cdot 10^{-4} \approx 7 \text{ W.}$$

Амплитуда колебаний индукции в зубцах статора

$$(B_p)_1 = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 t_s' \min} (B_{st\text{cp}})_1.$$

Так как

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{a_{4r}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{a_{4r}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,2}{0,04} \right)^2}{5 + \frac{0,2}{0,04}} = 2,5,$$

$$(B_p)_1 = \frac{2,5 \cdot 0,04}{2 \cdot 1,24} \cdot 12500 = 504.$$

Пульсационная потеря в статоре

$$(W_p)_s = 0,14 \left[\frac{u_2 \cdot n_2}{10\,000} \cdot \frac{(B_p)_1}{1\,000} \right]^2 \cdot G_{ss} = 0,14 \left[\frac{36 \cdot 1\,500}{10\,000} \cdot \frac{504}{1\,000} \right]^2 \cdot 6,3 \approx 7 \text{ W.}$$

Для ротора

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{a_{42}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{a_{42}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,25}{0,04} \right)^2}{5 + \frac{0,25}{0,04}} = 3,46,$$

$$(B_p)_2 = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2t_{2r}''_{\max}} (B_{ст.ср})_2 = \frac{3,46 \cdot 0,04}{2 \cdot 1,65} 13\,700 = 575.$$

Пульсационная потеря в роторе

$$(W_p)_r = 0,14 \left[\frac{u_1 \cdot n_2}{10\,000} \cdot \frac{(B_p)_2}{1\,000} \right]^2 \cdot G_{2r}.$$

Вес зубцов ротора

$$G_w = 7,8 \cdot l_0 \cdot h_{n2} [(D - 2\delta - h_{n2})\pi - u_2 \cdot b_{n2}] \cdot 10^{-3} = \\ = 7,8 \cdot 11,5 \cdot 1,9 [(19 - 2 \cdot 0,04 - 1,9)\pi - 36 \cdot 0,76] \cdot 10^{-3} \approx 4,5 \text{ kg,}$$

$$(W_p)_r = 0,14 \left[\frac{48 \cdot 1\,500}{10\,000} \cdot \frac{575}{1\,000} \right]^2 \cdot 4,5 \approx 12 \text{ W.}$$

Линейная скорость на поверхность контактных колец

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,125 \cdot 1\,500}{60} \approx 9,8 \text{ м/сек.}$$

Поверхность прилегания всех щеток

$$F_B = 3 \cdot 3 \cdot 3,5 = 31,5 \text{ см}^2.$$

Потери на трение на кольцах

$$(W_r)_k = 9,81 \cdot p_k \cdot F_B \cdot f_b \cdot v_k = 9,81 \cdot 0,2 \cdot 31,5 \cdot 0,18 \cdot 9,8 \approx 109 \text{ W.}$$

Диаметр вала

$$d_n \approx 28 \sqrt[3]{\frac{P}{n_s}} = 28 \sqrt[3]{\frac{5}{1\,500}} \approx 4,2 \text{ см.}$$

Примем

$$d_n = 4,2 \text{ см} = 42 \text{ мм.}$$

Диаметр цапфы возьмем

$$d_s \approx 0,7 \cdot d_n = 0,7 \cdot 4,2 = 2,94 \text{ см.}$$

Примем

$$d_s = 3 \text{ см} = 30 \text{ мм.}$$

Тогда

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60} = \frac{\pi \cdot 3 \cdot 1\,500}{60} = 236 \text{ см/сек.} < 550.$$

Длина цапфы

$$l_s \approx 2,7 \cdot d_s = 2,7 \cdot 3 \approx 8 \text{ см} = 80 \text{ мм.}$$

Так как

$$m_s = 2; \quad T_s = 12v_s + 20 = 12 \cdot 2,36 + 20 \approx 48^\circ,$$

то потеря на трение в подшипниках

$$(W_r)_s = m_s \cdot \frac{2\theta}{T_s} \cdot d_s \cdot l_s \cdot v_s^{1,5} = 2 \cdot \frac{2\theta}{48} \cdot 3 \cdot 8 \cdot 2,36^{1,5} \approx 94 \text{ W.}$$

Потерю на трение о воздух примем

$$(W_r)_f = 0,15 (W_r)_s = 0,15 \cdot 94 \approx 15 \text{ W.}$$

Омическая потеря в обмотках статора и ротора при холостом ходе

$$(W_R)_0 = I_{01}^2 (r_1 + 2r_2') = 11,7^2 (0,287 + 2 \cdot 0,115) \approx 71 \text{ W.}$$

Сумма потерь при холостом ходе

$$W_0 = (W_h)_{as} + (W_h)_{rs} + (W_p)_{as} + (W_p)_{rs} + (W_o)_s + (W_o)_r + (W_p)_s + (W_p)_r + (W_r)_s + (W_r)_r + (W_R)_0 = 38 + 27 + 13 + 21 + 8 + 7 + 7 + 12 + 109 + 94 + 15 + 71 \approx 420 \text{ W.}$$

Ваттная составляющая тока холостого хода

$$I_{03} = \frac{W_0}{E_1} = \frac{420}{210} = 2,00 \text{ A.}$$

Полный ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{01}^2 + I_{03}^2} = \sqrt{11,7^2 + 2,00^2} = 11,9 \text{ A.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{03}}{I_0} = \frac{2,00}{11,9} = 0,168.$$

Максимальная мощность двигателя

$$P_{\max} = E_1 \frac{I_k - I_0}{2(1 + \cos \varphi_k)} = 210 \frac{99 - 11,9}{2(1 + 0,25)} \approx 7330 \text{ W} = 7,33 \text{ kW.}$$

Коэффициент перегрузки

$$k_p = \frac{P_{\max}}{P} = \frac{7,33}{5} \approx 1,47,$$

что для однофазного двигателя вполне нормально.

Потери, обуславливающие нагревание статора.

$$W_s = (W_h)_{as} + (W_h)_{rs} + (W_p)_{as} + (W_p)_{rs} + (W_o)_s + (W_p)_s + \frac{l}{l_{a1}} I_1^2 \cdot r_1 = \\ = 43 + 30 + 15 + 24 + 8 + 8 + \frac{13,8}{38} \cdot 39,2^2 \cdot 0,287 = 289 \text{ W.}$$

Поверхность охлаждения статора

$$O_s = \pi(D + 2h_{n1} + 2h_s)(l - bL) + \pi(h_{n1} + h_s)(D + h_{n1} + h_s)(2 + b) = \\ = \pi(19 + 2 \cdot 2,4 + 2 \cdot 3,5)(13,8 - 1 \cdot 1) + \pi(2,4 + 3,5)(19 + 2,4 + 3,5)(2 + 1) = 2620 \text{ cm}^2.$$

Принимая $C_s = 300$, получим повышение температуры статора

$$t_s = C_s \frac{W_s}{O_s} = 300 \frac{289}{2620} \approx 33^\circ \text{C.}$$

что допустимо как по русским, так и по германским нормам.

Так как двигатель принадлежит к разряду низковольтных, то проверки нагревания меди не производим.

Потери, обуславливающие нагревание ротора

$$W_R = (W_o)_r + (W_p)_r + \frac{l}{l_o} \cdot 3 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = \\ = 7 + 13 + \frac{13,8}{34} \cdot 3 \cdot 183^2 \cdot 0,0043 = 196 \text{ W.}$$

Поверхность охлаждения ротора

$$O_R = \pi(D - 2\delta)(l - bL) + \pi(h_{n2} + h_r)[(D - 2\delta) - h_{n2} - h_r](2 + b) = \\ = \pi(19 - 2 \cdot 0,04)(13,8 - 1 \cdot 1) + \\ + \pi(1,9 + 3)[(19 - 2 \cdot 0,04) - 1,9 - 3](2 + 1) \approx 1410 \text{ см}^2.$$

Повышение температуры ротора

$$t_R = C_R \frac{W_R}{O_R(1 + 0,1v)} = 400 \frac{196}{1410(1 + 0,1 \cdot 14,9)} \approx 23^\circ \text{C}.$$

Повышение температуры подшипников, по уравнению (346)

$$t_s = \frac{(W_r)_s' \cdot 5}{\pi \cdot d_s \cdot l_s} = \frac{47 \cdot 5}{\pi \cdot 3 \cdot 8} \approx 3,5^\circ.$$

Вес статора

$$G_s = G_{as} + G_{ms} + (G_{cu})_s.$$

Так как

$$G_{as} = 24 \text{ кг}, \quad G_{ms} = 6,3 \text{ кг}, \\ (G_{cu})_s = 2 \cdot w_1 \cdot m_1 \cdot l_{s1} \cdot q_s \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = \\ = 2 \cdot \frac{144}{2} \cdot 3 \cdot 38 \cdot 8,042 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} \approx 11,7 \text{ кг}^1),$$

то

$$G_s = 24 + 6,3 + 11,7 \approx 42 \text{ кг}.$$

Вес ротора

$$O_R = (G_{Fe})_r + (G_{cu})_r + G_n + G_s + G_k. \\ (G_{Fe})_r = 24,5 \cdot l_0 \cdot h_r(D - 2\delta - 2h_{n2} - h_r)10^{-3} + \\ + 7,8 \cdot l_0 \cdot h_{n2}[(D - 2\delta - h_{n2})\pi - u_2 \cdot b_{n2}] \cdot 10^{-3} = \\ = 24,5 \cdot 11,5 \cdot 3(19 - 2 \cdot 0,04 - 2 \cdot 1,9)10^{-3} + \\ + 7,8 \cdot 11,5 \cdot 1,9[(19 - 2 \cdot 0,04 - 1,9)\pi - 36 \cdot 0,76] \cdot 10^{-3} = 17,3 \text{ кг}. \\ (G_{cu})_r = 2 \cdot w_2 \cdot m_2 \cdot l_{r2} \cdot q_r \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} = \\ = 2 \cdot 12 \cdot 3 \cdot 34 \cdot 42 \cdot 8,9 \cdot 10^{-5} \approx 9,2 \text{ кг}.$$

$$\left. \begin{aligned} G_n &\approx 4 \text{ кг} \\ G_s &\approx 2 \text{ " } \\ G_k &\approx 2 \text{ " } \end{aligned} \right\} \text{ (по эскизам).}$$

Тогда

$$O_R \approx 17,3 + 9,2 + 4 + 2 + 2 \approx 35 \text{ кг}.$$

Общий вес активного железа

$$G_{Fe} = (G_{Fe})_s + (G_{Fe})_r = 24 + 6,3 + 17,3 \approx 48 \text{ кг}.$$

Общий вес активной меди

$$G_{cu} = \frac{2}{3} (G_{cu})_s = (G_{cu})_r^2),$$

т.-е.

$$G_{cu} = \frac{2}{3} \cdot 11,7 + 9,2 = 17 \text{ кг}.$$

¹⁾ Величина $\frac{144}{2}$ представляет собой число витков на 1 фазу. Так как, вместе с пусковой обмоткой имеется три фазы, то m_1 взято равным 3.

²⁾ Так как пусковая обмотка не является активной, то, вводя коэффициент $\frac{2}{3}$, мы ее вес исключаем.

Полный вес активного материала

$$G_{ak} = G_{Fe} + G_{Cu} = 48 + 17 = 65 \text{ kg.}$$

Полный вес машины

$$G_A = G_s + G_R = 42 + 35 = 77 \text{ kg.}$$

Коэффициент конструктивного совершенства

$$K = \frac{G_{ak}}{G_A} = \frac{65}{77}.$$

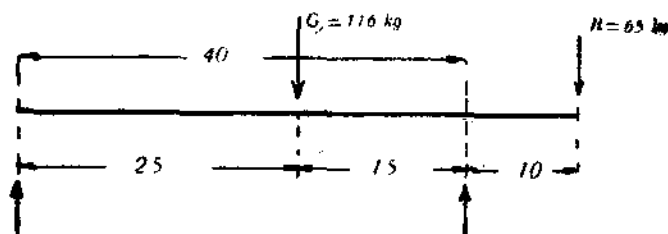
Вес на 1 kW

$$g_{Cu} = \frac{G_{Cu}}{P} = \frac{17}{5} = 3,4 \text{ kg/kW,}$$

$$g_{Fe} = \frac{G_{Fe}}{P} = \frac{48}{5} = 9,6 \text{ kg/kW,}$$

$$g_{ak} = \frac{G_{ak}}{P} = \frac{65}{5} = 13 \text{ kg/kW,}$$

$$g_A = \frac{G_A}{P} = \frac{77}{5} = 15,4 \text{ kg/kW.}$$



Фиг. 111.

Начертив эскиз расположения отдельных частей мотора (фиг. 111), найдем что

$$l = 40 \text{ cm; } a = 25 \text{ cm; } b = 15 \text{ cm; } l_1 = 10 \text{ cm.}$$

Для расчета вала будем исходить из силы, обусловленной весом

$$G = G_R - 0,5 \cdot G_n + G_o.$$

Сила одностороннего магнитного притяжения

$$G_o = \alpha_i \cdot \pi \cdot D \cdot l_o \left(\frac{B_i}{5000} \right)^2 \cdot \frac{f_n}{\delta}.$$

Выбирая

$$f_n = 0,1 \cdot \delta = 0,1 \cdot 0,04 = 0,004 \text{ cm,}$$

найдем

$$G_o = 0,71 \cdot \pi \cdot 19 \cdot 11,5 \cdot \left(\frac{5500}{5000} \right)^2 \cdot \frac{0,004}{0,04} = 59 \text{ kg.}$$

Тогда

$$G = 35 - 0,5 \cdot 4 + 59 = 92 \text{ kg.}$$

Максимальный крутящий момент

$$\begin{aligned} M_{d \max} &\approx 2 \cdot M_{dn} = 2 \cdot 102 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P}{n} \cdot 10^3 = \\ &= 2 \cdot 102 \cdot \frac{30}{\pi} \cdot \frac{5}{1500} \cdot 10^3 = 650 \text{ cmkg.} \end{aligned}$$

Выбирая окружную скорость шкива

$$v_s \approx 15 \text{ м/сек.}$$

найдем его диаметр

$$d_s = \frac{60 \cdot v_s}{\pi \cdot n_s} \cdot 100 = \frac{60 \cdot 15}{\pi \cdot 1500} \cdot 100 \approx 19 \text{ см.}$$

Примем

$$d_s = 20 \text{ см;}$$

тогда изгибающая сила

$$R \approx 2 \frac{M_{d \max}}{d_s} = 2 \frac{650}{20} = 65 \text{ кг.}$$

Результирующий изгибающий момент

$$\begin{aligned} M_{br} &= \sqrt{\left(\frac{ab}{l} \cdot G\right)^2 + \left(\frac{al_1}{l} \cdot R\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{25 \cdot 15}{40} \cdot 92\right)^2 + \left(\frac{25 \cdot 10}{40} \cdot 65\right)^2} = 952 \text{ смкг.} \end{aligned}$$

Максимальный расчетный изгибающий момент

$$\begin{aligned} M_{i \max} &= 0,35 \cdot M_{br} + 0,65 \sqrt{M_{br}^2 + M_{d \max}^2} = \\ &= 0,35 \cdot 952 + 0,65 \sqrt{952^2 + 650^2} = 1090 \text{ смкг.} \end{aligned}$$

Расчетное усилие

$$G_s = \frac{l}{ab} \cdot M_{i \max} = \frac{40}{25 \cdot 15} \cdot 1090 \approx 116 \text{ кг.}$$

Тогда диаметр вала

$$d_n = \sqrt[4]{\frac{G_s \cdot a^3 \cdot b^3}{1,1 \cdot 10^8 \cdot l \cdot f_n}} = \sqrt[4]{\frac{116 \cdot 25^3 \cdot 15^3}{1,1 \cdot 10^8 \cdot 40 \cdot 0,004}} \approx 5,5.$$

Таким образом, принятый нами ранее диаметр вала $d_n = 4,2 \text{ см}$ следует увеличить до

$$d_n = 55 \text{ мм.}$$

Изгибающий момент правого подшипника

$$M_b = R \cdot l_1 = 65 \cdot 10 = 650 \text{ смкг}$$

и расчетный изгибающий момент

$$\begin{aligned} M_i &= 0,35 \cdot M_b + 0,65 \sqrt{M_b^2 + M_{d \max}^2} = \\ &= 0,35 \cdot 650 + 0,65 \sqrt{650^2 + 650^2} = 824 \text{ смкг.} \end{aligned}$$

Тогда диаметр правой цапфы

$$d_{s1} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_i}{k_b}}.$$

Принимая

$$k_b = 500 \text{ кг/см}^2,$$

найдем

$$d_{s1} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 824}{500}} \approx 2,55 \text{ см.}$$

Сила, действующая на правый подшипник,

$$G_{s1} = \sqrt{\left(\frac{a}{l} \cdot G_i\right)^2 + \left(\frac{l+l_1}{l} R\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{25}{40} \cdot 116\right)^2 + \left(\frac{40+10}{40} \cdot 65\right)^2} \approx 109 \text{ kg.}$$

Тогда длина цапфы

$$l_{s1} \geq \frac{\pi \cdot G_{s1}}{180} \cdot \frac{n}{1000} = \frac{\pi \cdot 109}{180} \cdot \frac{1500}{1000} \approx 2,85 \text{ cm.}$$

Удельное давление

$$p_{s1} = \frac{G_{s1}}{d_{s1} \cdot l_{s1}} = \frac{109}{2,55 \cdot 2,85} \approx 15 \text{ kg/cm}^2.$$

Сила, действующая на левую цапфу

$$G_{s2} = \sqrt{\left(\frac{b}{l} \cdot G_i\right)^2 + \left(\frac{l_1}{l} R\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{15}{40} \cdot 116\right)^2 + \left(\frac{10}{40} \cdot 65\right)^2} = 47,5 \text{ kg.}$$

Выбирая

$$p_{s1} = p_{s2} = 15 \text{ kg/cm}^2,$$

найдем диаметр левой цапфы

$$d_{s2} = \sqrt[4]{\frac{5 \cdot G_{s2}^3}{k_b \cdot p_{s2}}} = \sqrt[4]{\frac{5 \cdot 47,5^3}{500 \cdot 15}} = 1,1 \text{ cm}$$

и ее длину

$$l_{s2} = d_{s2} \sqrt{\frac{0,2 \cdot k_b}{p_{s2}}} = 1,1 \sqrt{\frac{0,2 \cdot 500}{15}} = 2,84 \text{ cm.}$$

Найденные здесь значения с точки зрения величины p_s слишком малы. Ранее установленные значения

$$d_{s1} = d_{s2} = 3 \text{ cm, } l_{s1} = l_{s2} = 9 \text{ cm}$$

дают

$$p_{s1} = \frac{G_{s1}}{d_{s1} \cdot l_{s1}} = \frac{109}{3 \cdot 9} = 4,55 \text{ kg/cm}^2,$$

$$p_{s2} = \frac{G_{s2}}{d_{s2} \cdot l_{s2}} = \frac{47,5}{3 \cdot 9} = 1,98 \text{ kg/cm}^2,$$

поэтому на них и останавливаемся.

По германскому стандарту для шкива диаметром $d_s = 20 \text{ cm}$, следует взять ширину

$$b_s = 12 \text{ cm}$$

и ширину ремня

$$b_r = 10 \text{ cm.}$$

Натяжение ремня

$$S_{\max} = 3 \cdot 10^5 \cdot \frac{P}{n \cdot d_s} = 3 \cdot 10^5 \cdot \frac{5}{1500 \cdot 20} = 50 \text{ kg.}$$

При скорости

$$v_s \approx 15 \text{ m/сек.}$$

нагрузка на 1 cm ширины ремня

$$k = 5,5 \text{ kg/cm,}$$

что дает ширину ремня

$$b_r = \frac{S_{\max}}{k} = \frac{50}{5,5} = 9,1 \text{ cm,}$$

мы же приняли выше

$$b_r = 10 \text{ cm.}$$

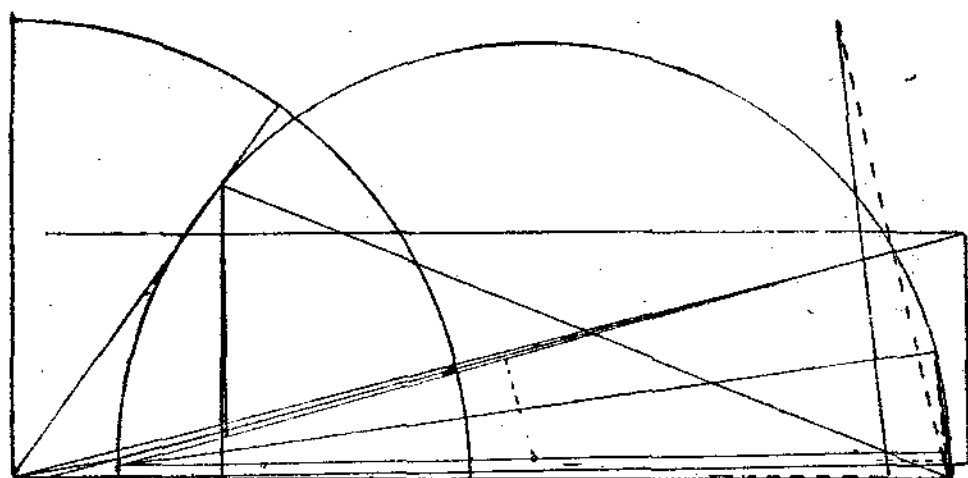
По найденным значениям

$$I_k = 99 \text{ A}; \cos \varphi_k = 0,25,$$

$$I_0 = 11,9 \text{ A}; \cos \varphi_0 = 0,168$$

строим диаграмму Ossappa-Sumec'a (фиг. 112), из которой можно получить следующие значения при полной нагрузке:

статорный ток	$I_1 = 39,2 \text{ A}$
потребляемая мощность	$P_s = 5,93 \text{ kW}$
вращающий момент	$M = 3,25 \text{ mkg}$
полезная мощность	$P = 5 \text{ kW}$
скольжение	$s = 0,05 = 5,0\%$
коэффициент полезного действия . .	$\eta = 84,5\%$
коэффициент мощности	$\cos \varphi = 0,81.$



Фиг. 112.

На фиг. 113 построены рабочие кривые в функции полезной мощности.

Для расчета пускового приспособления примем пусковой ток

$$I_{1A} = 1,2 \cdot I_1 = 1,2 \cdot 39,2 \approx 47 \text{ A} = I_1.$$

Угол β примем равным 30° .

Полное сопротивление

$$Z = \frac{E_1}{I_{1A}} = \frac{210}{47} = 4,47 \Omega.$$

Принимая угол $\varphi_k = 30^\circ$, найдем

$$Z_k = \frac{2Z}{\sqrt{\left[3 + \frac{\lg \beta}{\cos 2\beta} (\sin 2\beta + \sin 2\varphi_k)\right]^2 + \left(\frac{\lg \beta \cdot \cos 2\varphi_k}{\cos 2\beta}\right)^2}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 4,47}{\sqrt{\left[3 + \frac{\lg 30^\circ}{\cos 60^\circ} (\sin 60^\circ + \sin 60^\circ)\right]^2 + \left(\frac{\lg 30^\circ \cdot \cos 60^\circ}{\cos 60^\circ}\right)^2}} = 1,785 \Omega.$$

Далее строим диаграмму Ossanna-Sumec'a, как для трехфазного двигателя по данным

$$I_k = 99 \text{ A}; I_0 = \sqrt{I_{\mu}^2 + I_{02}^2} = \sqrt{5,97^2 + 2^2} = 6,3 \text{ A},$$

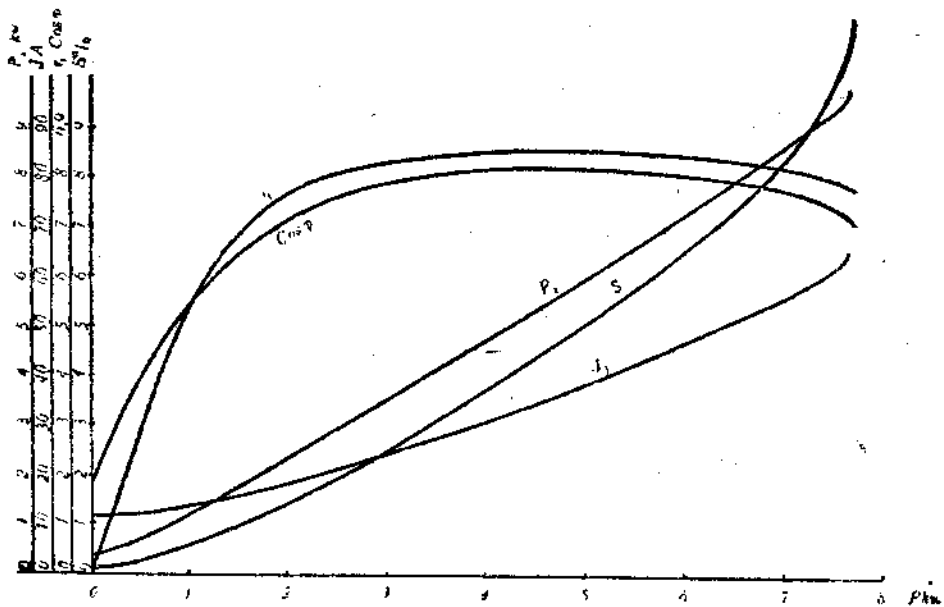
$$\cos \varphi_k = 0,25; \cos \varphi_0 = \frac{I_{02}}{I_0} = \frac{2}{6,3} = 0,32.$$

На эту диаграмму (фиг. 114) наносим ток короткого замыкания

$$OB = \frac{E_1}{2 \cdot Z_k} = \frac{210}{2 \cdot 1,785} = 58,8 \text{ A}$$

и определяем отношение

$$a = \frac{Av}{rv} = 12.$$



Фиг. 119.

Тогда

$$R_0 = r_2 (a - 1) = 0,0043 (12 - 1) = 0,047 \text{ } \Omega.$$

По диаграмме угол

$$\varphi_k = 36^\circ 23'.$$

Подставляя это значение в выражение для Z_k , получим

$$Z_k = \frac{2 \cdot 4,47}{\sqrt{\left[3 + \frac{\lg 30^\circ}{\cos 60^\circ} (\sin 60^\circ + \sin 72^\circ 46')\right]^2 + \left(\frac{\lg 30^\circ \cdot \cos 72^\circ 46'}{\cos 60^\circ}\right)^2}} = 1,75 \text{ } \Omega,$$

т.е. ошибка составляет всего около 2,20%, что вполне допустимо.

Величина

$$I_2' \approx 0,95 \cdot I_1 = 0,95 \cdot 47 \approx 44,7 \text{ A}.$$

Полное омическое сопротивление ротора при пуске

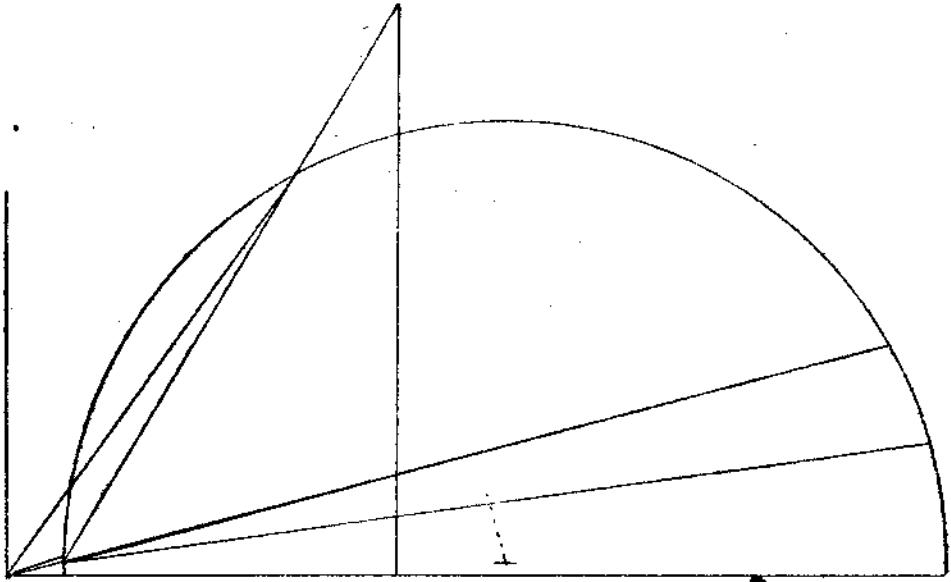
$$R_2 = R_0 + r_2 = 0,047 + 0,0043 = 0,0513 \, \Omega,$$

а приведенное к статору

$$R_2' = R_2 \frac{f_1^2 \omega_1^2}{4 \cdot f_2^2 \cdot \omega_2^2} = 0,0513 \frac{0,829^2 \cdot 144^2}{4 \cdot 0,98^2 \cdot 12^2} \approx 1,38 \, \Omega.$$

Пусковой момент в синхронных ваттах

$$P_A = (I_2')^2 \cdot R_2' = 44,7^2 \cdot 1,38 \approx 2760 \, \text{W}.$$



Фиг. 114.

Так как нормальный момент в синхронных ваттах

$$P = 5000 \, \text{W},$$

то пусковой момент составляет

$$\frac{2760}{5000} \cdot 100 \approx 55\% \text{ от } P.$$

Сопротивление R имеет величину

$$R = 2 \cdot Z_k \frac{\sin(\varphi_k + \beta)}{\cos 2\beta} \sin \beta = 2 \cdot 1,75 \frac{\sin(36^\circ 23' + 30^\circ)}{\cos 60^\circ} \sin 30^\circ = 3,71 \, \Omega.$$

Дроссельная катушка X имеет индуктивность

$$X = 2 \cdot Z_k \frac{\cos(\varphi_k - \beta)}{\cos 2\beta} \sin \beta = 2 \cdot 1,75 \frac{\cos(36^\circ 23' - 30^\circ)}{\cos 60^\circ} \sin 30^\circ = 3,48 \, \Omega.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ I.

Таблицы стержневых роторных обмоток двухслойного типа.

ТАБЛИЦА I.

Обмотки с удлинением перехода.

Число полюсов	Синхронное число обмоток	Число впадин	Число впадин на полюс и фазу	Шаг обмотки		Поворотные соединения	Начала фаз	Концы фаз	Примечания
				задний	передний				
2p	p _н	u _н	q _н	y ₁	y ₂				
2	3 000	24	4	12	13	16 _н — 4 _н 24 _н — 12 _н 8 _н — 20 _н	1 _н 9 _н 17 _н	13 _н 21 _н 5 _н	Симметричные выводы
2	3 000	30	5	15	16	20 _н — 5 _н 30 _н — 15 _н 10 _н — 25 _н	1 _н 11 _н 21 _н	16 _н 26 _н 6 _н	То же
2	3 000	36	6	18	19	24 _н — 6 _н 36 _н — 18 _н 12 _н — 30 _н	1 _н 13 _н 25 _н	19 _н 31 _н 7 _н	"
2	3 000	42	7	21	22	28 _н — 7 _н 42 _н — 21 _н 14 _н — 35 _н	1 _н 15 _н 29 _н	22 _н 36 _н 8 _н	"
2	3 000	48	8	24	25	32 _н — 8 _н 48 _н — 24 _н 16 _н — 40 _н	1 _н 17 _н 33 _н	25 _н 41 _н 9 _н	"
2	3 000	54	9	27	28	36 _н — 9 _н 54 _н — 27 _н 18 _н — 45 _н	1 _н 19 _н 37 _н	28 _н 46 _н 10 _н	"
4	1 500	36	3	9	9—10	30 _н — 3 _н 18 _н — 27 _н 6 _н — 15 _н	1 _н 25 _н 13 _н	10 _н 34 _н 22 _н	"
4	1 500	48	4	12	12—13	40 _н — 4 _н 24 _н — 36 _н 8 _н — 20 _н	1 _н 33 _н 17 _н	13 _н 45 _н 29 _н	"
4	1 500	60	5	15	15—16	50 _н — 5 _н 30 _н — 45 _н 10 _н — 25 _н	1 _н 41 _н 21 _н	16 _н 56 _н 36 _н	"
4	1 500	72	6	18	18—19	60 _н — 6 _н 36 _н — 54 _н 12 _н — 30 _н	1 _н 49 _н 25 _н	19 _н 67 _н 43 _н	"

Продолжение.

Число полюсов	Синхронное число оборотов	Число впадин	Число впадин на полюс и фазу	Шаг обмотки		Поворотные соединения	Начала фаз	Концы фаз	Примечания
				задний	передний				
2p	n	u ₂	q ₂	y ₁	y ₂				
4	1500	84	7	21	21—22	70 _н —7 _н 42 _н —63 _н 14 _н —35 _н	1 _н 57 _н 29 _н	22 _н 78 _н 50 _н	Симметричные выводы
4	1500	96	8	24	24—25	80 _н —8 _н 48 _н —72 _н 16 _н —40 _н	1 _н 65 _н 33 _н	25 _н 89 _н 57 _н	То же
6	1000	54	3	9	9—10	48 _н —3 _н 18 _н —27 _н 42 _н —57 _н	1 _н 25 _н 49 _н	10 _н 34 _н 4 _н	Несимметричные выводы
6	1000	72	4	12	12—13	64 _н —4 _н 24 _н —36 _н 56 _н —68 _н	1 _н 33 _н 65 _н	13 _н 45 _н 5 _н	То же
6	1000	90	5	15	15—16	80 _н —5 _н 30 _н —45 _н 70 _н —85 _н	1 _н 41 _н 81 _н	16 _н 56 _н 6 _н	"
6	1000	108	6	18	18—19	96 _н —6 _н 36 _н —54 _н 84 _н —102 _н	1 _н 49 _н 97 _н	19 _н 67 _н 7 _н	"
8	750	72	3	9	9—10	66 _н —3 _н 18 _н —27 _н 42 _н —51 _н	1 _н 25 _н 49 _н	10 _н 34 _н 58 _н	Симметричные выводы
8	750	96	4	12	12—13	88 _н —4 _н 24 _н —36 _н 56 _н —68 _н	1 _н 33 _н 65 _н	13 _н 45 _н 77 _н	То же
8	750	120	5	15	15—16	110 _н —5 _н 30 _н —45 _н 70 _н —85 _н	1 _н 41 _н 81 _н	16 _н 56 _н 96 _н	"
8	750	144	6	18	18—19	132 _н —6 _н 36 _н —54 _н 84 _н —102 _н	1 _н 49 _н 97 _н	19 _н 67 _н 115 _н	"
10	600	90	3	9	9—10	84 _н —3 _н 54 _н —63 _н 24 _н —33 _н	1 _н 61 _н 31 _н	10 _н 70 _н 40 _н	"
10	600	120	4	12	12—13	112 _н —4 _н 72 _н —81 _н 32 _н —44 _н	1 _н 81 _н 41 _н	13 _н 93 _н 53 _н	"

Продолжение.

Число полюсов	Синхронное число оборотов	Число впадин	Число впадин на полюс и фазу	Шаг обмотки		Поворотные соединения	Начала фаз	Концы фаз	Примечания
				задний	передний				
2p	n ₂	u ₂	q ₂	у ₁	у ₂				
10	600	150	5	15	15—16	140 _н —5 _н 30 _н —45 _н 70 _н —95 _н	1 _в 41 _в 81 _в	16 _в 56 _в 106 _в	Несимметричные выводы
12	500	108	3	9	9—10	102 _н —3 _н 66 _н —75 _н 30 _н —39 _н	1 _в 73 _в 37 _в	10 _в 82 _в 46 _в	Симметричные выводы
12	500	144	4	12	12—13	136 _н —4 _н 24 _н —36 _н 56 _н —68 _н	1 _в 33 _в 65 _в	13 _в 45 _в 77 _в	Несимметричные выводы
12	500	180	5	15	15—16	170 _н —5 _н 110 _н —125 _н 50 _н —65 _н	1 _в 121 _в 61 _в	16 _в 136 _в 76 _в	Симметричные выводы
16	375	144	3	9	9—10	138 _н —3 _н 90 _н —99 _н 42 _н —51 _н	1 _в 97 _в 49 _в	10 _в 106 _в 58 _в	То же
16	375	192	4	12	12—13	184 _н —4 _н 24 _н —36 _н 56 _н —68 _н	1 _в 33 _в 65 _в	13 _в 45 _в 77 _в	Несимметричные выводы
16	375	240	5	15	15—16	230 _н —5 _н 150 _н —165 _н 70 _н —85 _н	1 _в 161 _в 81 _в	16 _в 176 _в 96 _в	Симметричные выводы
24	250	216	3	9	9—10	210 _н —3 _н 18 _н —27 _н 42 _н —51 _н	1 _в 25 _в 49 _в	10 _в 34 _в 58 _в	Несимметричные выводы
24	250	288	4	12	12—13	280 _н —4 _н 24 _н —36 _н 56 _н —68 _н	1 _в 33 _в 65 _в	13 _в 45 _в 77 _в	То же
48	125	288	2	6	6—7	284 _н —2 _н 12 _н —18 _н 28 _н —34 _н	1 _в 17 _в 33 _в	7 _в 23 _в 39 _в	"
48	125	432	3	9	9—10	426 _н —3 _н 18 _н —27 _н 42 _н —51 _н	1 _в 25 _в 49 _в	10 _в 34 _в 58 _в	"
48	125	576	4	12	12—13	568 _н —4 _н 24 _н —36 _н 56 _н —68 _н	1 _в 33 _в 65 _в	13 _в 45 _в 77 _в	"

ТАБЛИЦА II
Обмотки с укорочением перехода.

Число полюсов	Синхронное число обмоток	Число впадин	Число впадин на полюс и фазу	Шаг обмотки		Поворотные соединения	Начала фаз	Концы фаз	Примечания
				задний	передний				
2p	p _н	п _в	q _н	у ₁	у ₂				
2	3 000	24	4	12	11	10 _н — 22 _н 18 _н — 6 _н 2 _н — 14 _н	1 _н 9 _н 17 _н	13 _н 21 _н 5 _н	Симметричные выводы
2	3 000	30	5	15	14	12 _н — 27 _н 23 _н — 7 _н 2 _н — 17 _н	1 _н 11 _н 21 _н	16 _н 26 _н 6 _н	То же
2	3 000	36	6	18	17	14 _н — 32 _н 26 _н — 8 _н 2 _н — 20 _н	1 _н 13 _н 25 _н	19 _н 31 _н 7 _н	"
2	3 000	42	7	21	20	16 _н — 37 _н 30 _н — 9 _н 2 _н — 23 _н	1 _н 15 _н 29 _н	22 _н 36 _н 8 _н	"
2	3 000	48	8	24	23	18 _н — 42 _н 34 _н — 10 _н 2 _н — 26 _н	1 _н 17 _н 33 _н	25 _н 41 _н 9 _н	"
2	3 000	54	9	27	26	20 _н — 47 _н 38 _н — 11 _н 2 _н — 29 _н	1 _н 19 _н 37 _н	28 _н 46 _н 10 _н	"
4	1 500	36	3	9	9—8	26 _н — 35 _н 14 _н — 23 _н 2 _н — 11 _н	1 _н 25 _н 13 _н	10 _н 34 _н 22 _н	"
4	1 500	48	4	12	12—11	34 _н — 46 _н 18 _н — 30 _н 2 _н — 14 _н	1 _н 33 _н 17 _н	13 _н 45 _н 29 _н	"
4	1 500	60	5	15	15—14	42 _н — 57 _н 22 _н — 37 _н 2 _н — 17 _н	1 _н 41 _н 21 _н	16 _н 56 _н 36 _н	"
4	1 500	72	6	18	18—17	50 _н — 68 _н 26 _н — 44 _н 2 _н — 20 _н	1 _н 49 _н 25 _н	19 _н 67 _н 43 _н	"
4	1 500	84	7	21	21—20	58 _н — 79 _н 30 _н — 51 _н 2 _н — 23 _н	1 _н 57 _н 29 _н	22 _н 78 _н 50 _н	"

Продолжение.

Число полюсов	Синхронное число оборотов	Число впадин	Число впадин на полюс и фазу	Шаг обмотки		Поворотные соединения	Начала фаз	Концы фаз	Примечания
				задний	передний				
2p	p ₂	u ₂	q ₂	y ₁	y ₂				
4	1500	96	8	24	24—23	66 _н —90 _н 34 _н —58 _н 2 _н —26 _н	1 _н 65 _н 33 _н	25 _н 89 _н 57 _н	Симметричные выводы
6	1000	54	3	9	9—8	44 _н —53 _н 14 _н —23 _н 38 _н —47 _н	1 _н 25 _н 49 _н	10 _н 34 _н 4 _н	Несимметричные выводы
6	1000	72	4	12	12—11	58 _н —70 _н 18 _н —30 _н 50 _н —62 _н	1 _н 33 _н 65 _н	13 _н 45 _н 5 _н	То же
6	1000	90	5	15	15—14	72 _н —87 _н 22 _н —37 _н 62 _н —77 _н	1 _н 41 _н 81 _н	16 _н 56 _н 6 _н	.
6	1000	108	6	18	18—17	86 _н —104 _н 26 _н —44 _н 74 _н —92 _н	1 _н 49 _н 97 _н	19 _н 67 _н 7 _н	.
8	750	72	3	9	9—8	62 _н —71 _н 14 _н —23 _н 38 _н —47 _н	1 _н 25 _н 49 _н	10 _н 34 _н 53 _н	Симметричные выводы
8	750	96	4	12	12—11	82 _н —94 _н 18 _н —30 _н 50 _н —62 _н	1 _н 33 _н 65 _н	13 _н 45 _н 77 _н	То же
8	750	120	5	15	15—14	102 _н —117 _н 22 _н —7 _н 62 _н —77 _н	1 _н 41 _н 81 _н	16 _н 56 _н 96 _н	.
8	750	144	6	18	18—17	122 _н —140 _н 26 _н —44 _н 74 _н —92 _н	1 _н 49 _н 97 _н	19 _н 67 _н 115 _н	.
10	600	90	3	9	9—8	80 _н —89 _н 14 _н —23 _н 38 _н —47 _н	1 _н 25 _н 49 _н	10 _н 34 _н 53 _н	Несимметричные выводы
10	600	120	4	12	12—11	106 _н —118 _н 66 _н —78 _н 26 _н —38 _н	1 _н 81 _н 41 _н	13 _н 93 _н 53 _н	Симметричные выводы
10	600	150	5	15	15—14	132 _н —147 _н 82 _н —97 _н 32 _н —47 _н	1 _н 101 _н 51 _н	16 _н 116 _н 66 _н	То же

Продолжение.

Число полюсов	Синхронное число полюсов	Число впадин	Число полюсов на полюс и фазу	Шаг обмотки		Поворотные соединения	Начала фаз	Концы фаз	Примечания
				задний	передний				
$2p$	n_s	n_z	q_z	y_1	y_2				
12	500	108	3	9	9—8	98 _н — 107 _н 14 _н — 23 _н 38 _н — 47 _н	1 _н 25 _н 49 _н	10 _н 34 _н 58 _н	Несимметричные выводы
12	500	144	4	12	12—11	130 _н — 142 _н 82 _н — 94 _н 34 _н — 46 _н	1 _н 97 _н 49 _н	13 _н 109 _н 61 _н	Симметричные выводы
12	500	180	5	15	15—14	102 _н — 177 _н 22 _н — 37 _н 62 _н — 77 _н	1 _н 41 _н 81 _н	16 _н 56 _н 96 _н	Несимметричные выводы
16	375	144	3	9	9—8	134 _н — 143 _н 14 _н — 23 _н 38 _н — 47 _н	1 _н 25 _н 49 _н	10 _н 34 _н 58 _н	То же
16	375	192	4	12	12—11	178 _н — 190 _н 114 _н — 126 _н 50 _н — 62 _н	1 _н 129 _н 65 _н	13 _н 141 _н 77 _н	Симметричные выводы
16	375	240	5	15	15—14	222 _н — 237 _н 22 _н — 37 _н 62 _н — 77 _н	1 _н 41 _н 81 _н	16 _н 56 _н 96 _н	Несимметричные выводы
24	250	216	3	9	9—8	206 _н — 215 _н 14 _н — 23 _н 38 _н — 47 _н	1 _н 25 _н 49 _н	10 _н 34 _н 58 _н	То же
24	250	288	4	12	12—11	274 _н — 286 _н 18 _н — 30 _н 50 _н — 62 _н	1 _н 33 _н 65 _н	13 _н 45 _н 77 _н	.
48	125	288	2	6	6—5	282 _н — 288 _н 10 _н — 16 _н 26 _н — 32 _н	1 _н 17 _н 33 _н	7 _н 23 _н 39 _н	.
48	125	432	3	9	9—8	422 _н — 431 _н 14 _н — 23 _н 38 _н — 47 _н	1 _н 25 _н 49 _н	10 _н 31 _н 58 _н	.
48	125	576	4	12	12—11	562 _н — 574 _н 18 _н — 30 _н 50 _н — 62 _н	1 _н 33 _н 65 _н	13 _н 45 _н 77 _н	.

ПРИЛОЖЕНИЕ II.

Таблицы электродвигателей трехфазного тока, выполняемых заводами Государственного электротехнического Треста (ГЭТ).

Электродвигатели трехфазного тока. открытые, типа А, мощностью от 0,15 до 4,5 kW, и закрытые типа АЗ, мощностью от 0,15 до 3,3 kW, с короткозамкнутым якорем, для напряж. 120 — 500 V.

Т и п	Эффективная мощность		Число оборотов в минуту при 50 пер/сек.	Сила тока в каждом проводе в амперах при напряжении V				Расход энергии в kW	Вес двигателя без шкива в kg
	kW	л. с.		120	220	380	500		
Открытые 1500 об./мин.									
A-11/1500	0,25	0,3	1410	2,35	1,25 ¹⁾	0,75	—	0,35 ²⁾	26
A-12/1500	0,52	0,7	1410	4,2	2,3	1,35 ¹⁾	1,05	0,68 ²⁾	32
A-21/1500	1,0	1,4	1420	7,4	4,05	2,35	1,8	1,24	44
A-22/1500	1,75	2,4	1420	12,2	6,6	3,55	2,85	2,11	52
A-31/1500	2,85	3,9	1430	19,2	10,4	6,05	4,6	3,37	78
A-32/1500	4,5	6,1	1430	28,3	16,0	9,30	7,05	5,24	97
Открытые 1000 об./мин.									
A-11/1000	0,15	0,2	920	1,52 ¹⁾	0,95	—	—	0,16 ²⁾	26
A-12/1000	0,25	0,3	920	2,5	1,40 ¹⁾	0,85	—	0,36 ²⁾	32
A-21/1000	0,52	0,7	930	4,65	2,55	1,5 ¹⁾	1,15	0,70 ²⁾	44
A-22/1000	1,0	1,4	930	8,2	4,45	2,6	2,0 ¹⁾	1,27	52
A-31/1000	1,75	2,4	940	13,1	7,15	4,15	3,15	2,15	78
A-32/1000	2,85	3,9	940	21,2	11,6	6,7	5,1	3,52	97
Открытые 750 об./мин.									
A-31/750	1,0	1,4	705	9,1	4,95	2,90	2,20	1,32	78
A-32/750	1,75	2,4	703	14,5	7,9	4,60	3,50	2,22	97
Совершенно закрытые 1500 об./мин.									
A3-11/1500	0,25	0,3	1410	2,35	1,25 ¹⁾	0,75	—	0,35 ²⁾	30
A3-12/1500	0,52	0,7	1410	4,2	2,3	1,35 ¹⁾	1,05	0,68 ²⁾	35
A3-21/1500	0,85	1,2	1420	6,5	3,55	2,05	1,55 ¹⁾	1,07 ²⁾	48
A3-22/1500	1,0	1,4	1420	7,4	4,05	2,35	1,8	1,24	55
A3-31/1500	1,75	2,4	1430	12,2	6,6	3,85	2,95	2,11	83
A3-32/1500	2,0	2,7	1430	13,9	7,6	4,4	3,35	2,41	102
A3-41/1500	2,85	3,9	1440	19,2	10,5	6,2	4,6	3,48	130
A3-42/1500	3,3	4,5	1440	22,1	12,1	7,0	5,3	3,90	158
Совершенно закрытые 1000 об./мин.									
A3-11/1000	0,15	0,2	920	1,52 ¹⁾	0,95	—	—	0,16	30
A3-12/1000	0,25	0,3	920	2,5	1,40 ¹⁾	0,85	—	0,36 ²⁾	35
A3-21/1000	0,52	0,7	930	4,6	2,5	1,4 ¹⁾	1,15	0,69 ²⁾	48
A3-22/1000	0,7	1,0	930	6,0	3,3	1,9 ¹⁾	1,5	0,92 ²⁾	55
A3-31/1000	1,2	1,6	940	9,6	5,25	3,05	2,3	1,51	83
A3-32/1000	1,4	1,9	940	11,0	6,0	3,5	2,65	1,75	102
A3-41/1000	2,0	2,7	950	14,9	8,1	4,7	3,6	2,44	130
A3-42/1000	2,3	3,1	950	17,0	9,3	5,4	4,1	2,80	158
Совершенно закрытые 750 об./мин.									
A3-31/750	0,6	0,8	705	6,15	3,35	1,95 ¹⁾	1,55	0,84 ²⁾	88
A3-32/750	0,8	1,1	705	7,7	4,2	2,45	1,85 ¹⁾	1,06 ²⁾	102
A3-41/750	1,5	2,0	710	12,8	7,0	4,1	3,1	1,92	130
A3-42/750	1,8	2,5	710	14,9	8,1	4,7	3,6	2,28	153

¹⁾ Указанная сила тока соответствует соединению звездой; при соединении в треугольник сила тока несколько выше

²⁾ Указанный расход энергии соответствует всем напряжениям, кроме максимального; при максимальном напряжении расход энергии несколько выше.

Электродвигатели трехфазного тока, открытые, типа А, мощностью от 1,75 до 4,5 kW, закрытые, типа АЗ, мощностью от 1,2 до 3,3 kW, для напряжения 120—500 V, с контактными кольцами, с постоянно налегающими щетками или с приспособлением для подъема щеток и короткого замыкания колец.

Т и п	Эффективная мощность		Число оборотов в минуту при 50 пер/сек.	Сила тока в каждом проводе в амперах при напряжении V				Расход энергии в kW	Сила тока в роторе в А	Вес двигателя без щетки в kg
	kW	л. с.		120	220	380	500			
Открытые 1 500 об./мин. ¹⁾										
A-31/1 500	2,85	3,9	1 430	20,2	11,0	6,4	4,85	8,44	65	100
A-32/1 500	4,5	6,1	1 430	30,6	16,8	9,7	7,4	5,33	69	118
Открытые 1 000 об./мин.										
A-31/1 000	1,75	2,4	940	14,4	7,9	4,55	3,5	2,22	63	100
A-32/1 000	2,85	3,9	940	22,0	12,0	6,95	5,3	3,52	66	118
Совершенно закрытые 1 500 об./мин.										
A3-31/1 500	1,75	2,4	1 430	13,0	7,1	4,1	3,1	2,15	45	106
A3-32/1 500	2,0	2,7	1 430	14,8	8,1	4,7	3,55	2,45	40	125
A3-41/1 500 ¹⁾	2,85	3,9	1 440	20,2	11,0	6,4	4,85	3,43	53	155
A3-42/1 500 ¹⁾	3,3	4,5	1 440	23,2	12,7	7,4	5,6	3,97	46	182
Совершенно закрытые 1 000 об./мин.										
A3-31/1 000	1,2	1,6	940	10,6	5,8	3,35	2,55	1,56	51	106
A3-32/1 000	1,4	1,9	940	12,1	6,6	3,85	2,90	1,81	41	125
A3-41/1 000 ¹⁾	2,0	2,7	950	16,4	8,9	5,2	3,95	2,53	54	155
A3-42/1 000 ¹⁾	2,3	3,1	950	18,3	10,0	5,8	4,4	2,87	50	182
Совершенно закрытые 750 об./мин.										
A3-41/750 ¹⁾	1,7	2,3	710	15,2	8,3	4,8	3,65	2,24	60	155
A3-42/750 ¹⁾	2,0	2,7	710	18,4	9,5	5,5	4,2	2,60	53	182

¹⁾ Эти электродвигатели исполняются с приспособлением для подъема щеток и короткого замыкания колец, все остальные электродвигатели с постоянно налегающими щетками.

Электродвигатели трехфазного тока, открытые, типа Т, мощностью от 4,5 до 29 кВт для напряжения 120 — 500 В, с контактными кольцами, с постоянно налегающими щетками или с приспособлением для подъема щеток и короткого замыкания колец.

Т и п Т	Эффективная мощность		Число обо- ротов в ми- нуту при 50 пер. около	Сила тока в каждом проводе в амперах при напряжении V				Расход энергии в kW	Сила якор- ного тока в каждом кольце в А около	Вес двига- теля без щетки в кг
	kW	л. с.		120	220	380	500			
1500 оборотов в минуту										
1500/6,8	6,8	9,3	1430	45	24,5	14,2	10,8	7,95	24,3	93,0
1500/10	10,0	14	1430	65	35,5	20,5	15,6	11,6	48	130,0
1500/14,5	14,5	20	1445	93	51,0	29,5	22,3	16,8	45,5	169,0
1500/20,5 ¹⁾	20,5	28	1480	127	69,5	40,2	30,5	23,2	66	222,0
1500/29,1 ¹⁾	29	40	1480	177	97,0	56,0	42,5	32,4	62	268,0
1000 оборотов в минуту										
1000/4,5	4,5	6,1	940	33	18,0	10,4	7,9	5,45	22,5	98,0
1000/6,8	6,8	9,3	950	48	26,0	15,0	11,5	8,1	44	130,0
1000/10	10,0	14	950	69	37,5	21,7	16,5	11,8	45,5	169,0
1000/14,5 ¹⁾	14,5	20	955	96	52,5	30,3	23,0	16,7	47,5	222,0
1000/20,5 ¹⁾	20,5	28	965	132	72,0	41,7	31,7	23,4	47	268,0
750 оборотов в минуту										
750/4,5	4,5	6,1	700	35	19,0	11,0	8,4	5,6	33,5	130,0
750/6,8	6,8	9,3	705	51	27,8	16,0	12,2	8,35	32,5	169,0
750/10 ¹⁾	10,0	14	715	70	38,0	22,0	16,8	11,8	45,5	222,0
750/14,5 ¹⁾	14,5	20	715	98	53,5	31,0	23,5	16,9	46	268,0

¹⁾ Эти электродвигатели нормально исполняются с приспособлением для подъема щеток и короткого замыкания колец; все остальные электродвигатели с постоянно налегающими щетками.
 Для напряжений 380 и 500 В электродвигатели типа Т нормально исполняются с соединением обмоток статора звездой, для напряжений 120 и 220 В — нормальное соединение в треугольник.

Электродвигатели трехфазного тока, открытые, типа Д, мощностью от 36,8 до 74 кВт для напряжения 120 — 500 В, с контактными кольцами с постоянно налегающими щетками или с приспособлением для подъема щеток и короткого замыкания колец.

Т и п D	Эффективная мощность		Число оборотов в минуту при 50 пер.	Сила тока в каждом проводе в амперах при напряжении до, V				Расход энергии в kW	Сила якорного тока в каждом кольце в А около	Вес двигателя без шкива в кг
	kW	л. с.		120	220	380	500			
1500 оборотов в минуту										
1500/50	36,8	50	1480	213	115	67	51	40	185	699
1500/60	44,2	60	1460	263	143	83	63	48	185	778
1500/75	55,2	75	1460	312	171	99	75	60	185	1000
1500/100 ¹⁾	74	100	1460	427	233	135	102	80	205	1120
1500 оборотов в минуту										
1000/50	36,8	50	975	220	120	70	53	40,5	160	765
1000/60	44,2	60	975	264	144	83	63	48,5	180	890
1000/75	55,2	75	975	321	174	100	77	60	180	1033
1000/100	74	100	975	432	235	135	103	80	180	1262
750 оборотов в минуту										
750/50	36,8	50	725	223	121	71	54	40,5	142	885
750/60	44,2	60	725	264	143	83	63	48,5	150	977
750/75	55,2	75	730	326	178	108	78	60	155	1163
750/100	74	100	730	432	237	137	104	80	165	1372

¹⁾ Строится только для непосредственного соединения с рабочей машиной.

Если нет никаких указаний, то обычно моторы доставляются с соединением обмотки статора звездой. Они могут быть без всяких изменений на месте установки переключены в треугольник, так что могут быть подключены к сети, напряжение которой равняется 0,58 их нормального напряжения при соединении звездой; так, напр., моторы на 220 В могут, будучи переключены в соединение треугольником, работать от сети в 120 В.

Электродвигатели трехфазного тока, открытые, типа М, мощностью от 1,75 до 75 kW для напряжения 120—500 V с короткозамкнутым якорем (Ма), с контактными кольцами; с постоянно налегающими щетками (Мб), с приспособлением для подъема щеток и короткого замыкания колец (Мс).

Т и п	Эффективная мощность		Число оборотов в минуту при 50 пер./сек.	Сила тока в каждом проводе в амперах при напряжении между двумя проводами в V				Расход энергии в kW	Вес дви- гателя без шкива в kg
	kW	л. с.		120	220	380	500		
1500 оборотов в минуту									
Ma-280/4	2,85	3,9	1420	19,2	10,5	6,1	4,6	3,4	86
Mb-280/4	2,85	3,9	1420	20,5	11,2	6,5	5,0	3,55	96
Ma-281/4	4,5	6,1	1420	29,5	16,1	9,3	7	5,25	86
Mb-281/4	4,5	6,1	1420	30,5	16,6	9,6	7,3	5,35	97
Ma-300/4	6,8	9,3	1440	41	24,0	11	10,5	7,9	128
Mb-300/4	6,8	9,3	1440	45,5	25,0	14,5	11	8	143
Mb-330/4	10	14	1440	65	35,5	20,5	15,7	11,7	190
Mb-37/4	14,5	20	1450	93	51	29,5	22,5	16,8	245
Mc-400/4	20,5	28	1450	128	70,0	40,5	30,5	23,3	330
Mc-450/4	29	40	1450	178	97	56	42,5	32,5	425
Mc-500/4	40	55	1460	241	132	76	58	44,5	640
Mc-600/4	55,2	75	1460	325	177	103	78	60,5	860
Mc-601/4	75	102	1460	440	240	139	105	82	925
1000 оборотов в минуту									
Ma-280/6	1,75	2,4	985	13,2	7,2	4,2	3,2	2,17	86
Mb-28/6	1,75	2,4	985	14,5	7,9	4,6	3,5	2,25	96
Ma-281/6	2,85	3,9	935	21	11,5	6,6	5	3,45	86
Mb-281/6	2,85	3,9	935	22,2	12,1	7	5,3	3,55	97
Ma-300/6	4,50	6,1	950	31,5	17,2	10	7,5	5,35	128
Mb-300/6	4,50	6,1	950	33	18,0	10,5	8	5,45	143
Mb-330/6	6,8	9,3	650	48,5	26,5	15,5	11,7	8,2	190
Mb-370/6	10	14	950	69	38,0	22	16,5	11,9	245
Mc-400/6	14,5	20	960	95,5	52,0	30	23	16,7	330
Mc-450/6	20,5	28	960	133	72,5	42	32	23,5	425
Mc-500/6	29	40	965	184	100	58	44	33	640
Mc-600/6	40	55	965	248	135	79	60	45	850
Mc-601/6	55,2	75	970	335	183	106	80	61	915
Mc-660/6	75	102	970	453	247	143	109	82,5	1220
750 оборотов в минуту									
Mb-330/8	4,5	6,1	700	35	19,1	11	8,4	5,6	190
Mb-370/8	6,8	9,3	700	52	28,5	16,5	12,5	8,5	245
Mc-400/8	10	14	715	70	38	22	17	11,8	330
Mc-450/8	14,5	20	720	98	53,5	31	23,5	17	425
Mc-500/8	20,5	28	720	136	74	43	32,5	23,7	640
Mc-600/8	29	40	725	187	102	59	45	33	850
Mc-601/8	40	55	725	253	138	80	60,5	45	915
Mc-660/8	55,2	75	725	344	188	109	83	61,5	1220
Mc-661/8	75	102	725	460	251	145	110	83	1240

Для напряжений 380 и 500 V электродвигатели типа М нормально выполняются с соединением обмоток статора звездой, для напряжений 120 и 220 V—нормальное соединение в треугольник.

Электродвигатели трехфазного тока, закрытые, с вентиляцией, типа PRV, мощностью от 4,5 до 175 кВт для напряжений от 120 до 500 — 3000 В, с контактными кольцами, с приспособлением для подъема щеток и короткого замыкания колец.

Т и п PRV	Эффективная мощность		Число оборотов в минуту при 50 пер.	Напря- жение между двумя провода- ми ¹⁾ до	Сила тока в каждом про- воде А	Расход энергии в kW	Сила тока в каждом кольце А	Вес дви- гателя без шкива в kg
	kW	л. с.						
1500 оборотов в минуту								
114-1 500	4,5	6,1	1400	500	7,3	5,3	76	192
114a-1 500	6,8	9,3	1420	500	10,75	7,9	92	200
134a-1 500	10	14	1430	500	15,5	11,5	95	269
134d-1 500	14,5	20	1430	500	22	16,6	106	308
164c-1 500	20,5	28	1450	500	30,4	23,2	132	507
164f-1 500	29	40	1450	500	42,1	32,4	156	528
204e-1 500	40	55	1460	3000	56,8	44,2	173	778
204g-1 500	55	75	1460	3000	77,7	60,5	194	835
224h-1 500	75	102	1470	3000	105,2	82	206	1400
224ik-1 500	100	136	1470	3000	139,5	108,5	225	1650
244k-1 500	132	180	1470	3000	181,5	142,5	238	1880
1000 оборотов в минуту								
114a-1 000	4,5	6,1	940	500	7,7	5,4	73	196
134a-1 000	6,8	9,3	945	500	11,2	8	102	294
134d-1 000	10	14	955	500	16	11,6	112	322
164c-1 000	14,5	20	960	500	22,7	16,7	106	502
164f-1 000	20,5	28	960	3000	31,3	23,3	122	518
204e-1 000	29	40	965	3000	43,3	32,6	144	764
204g-1 000	40	55	970	3000	58,3	44,5	159	828
224h-1 000	55	75	975	3000	78,6	60,5	178	1050
224ik-1 000	75	102	975	3000	106,4	82	187	1280
244k-1 000	100	136	980	3000	141,3	108,7	225	1590
264l-1 000	132	180	980	3000	184,5	143,5	248	2465
750 оборотов в минуту								
134a-750	4,5	6,1	705	500	8,15	5,5	65	284
134d-750	6,8	9,3	710	500	11,8	8,2	76	302
164c-750	10	14	720	500	16,8	11,9	90	498
164f-750	14,5	20	725	500	23,2	16,9	105	523
204e-750	20,5	28	725	3000	31,9	23,5	107	775
204g-750	29	40	725	3000	44	32,8	122	825
224h-750	40	55	730	3000	60,3	44,7	134	1035
224ik-750	55	75	730	3000	81,2	61,1	144	1275
244k-750	75	102	730	3000	108,5	82,3	158	1475
264l-750	100	136	730	3000	143	109	174	1820
264m-750	132	180	730	3000	185	144,3	200	2000
284n-750	175	238	730	3000	246	189,4	208	2200

¹⁾ При напряжении в 3000 В мощность электродвигателей понижается на 10%.

III. Трехфазные асинхронные двигатели заводов ВЭО на 3000 оборотов для напряжения 115—3000 В.

Т и п D	Мощность открытого мотора		Напряжение между двумя проводами V	Сила тока в каждой рабо- чей проводке A	Якорь		Потребляемая мощ- ность		cos φ	Кoeffи- циент погос- ного дей- ствия %	Число оборотов в минуту	Вес мотора кг
	kW	л. с.			Ток в каждой при по- ряж. мот., в сост. по- тока A	Напряже- ние между двумя проводами V	kVA	kW				
3001/7,5	5,52	7,5	115—190 215—500	36,5—22 19,5—8,5	—	—	7,3	6,3	0,88	88,5	2 920	170
3001/10	7,36	10	115—190 215—500	47—28,5 25,5—11	—	—	9,4	8,4	0,89	88	2 920	180
	5,52	7,5	1 000	4,2	—	—	7,3	6,3	0,88	87		
3001/15	11	15	115—190 215—500	69—41,5 37—16	—	—	13,8	12,4	0,90	89	3 940	230
			1 000	8	—	—						
3001/20	14,7	20	115—190 215—500	90—54 48—20,5	—	—	17,9	16,4	0,91	90	2 930	280
			1 000	10,5	—	—						
3001/30	22	30	115—190 215—500	133—81 71,5—31	—	—	26,5	24,4	0,92	90,5	2 940	380
	14,7	20	1 000	15,5	—	—	18,3	16,4	0,89	89		
3001/40	29,4	40	115—190 215—500	177—108 95—41	—	—	35,2	32,4	0,92	91	2 945	440
	22	30	1 000	21,5	—	—	27,1	24,4	0,90	90,5		
3001/50	36,8	50	115—190 215—500	223—125 119—51	—	130	44,5	40,5	0,91	91	2 945	520
	29,4	40	1 000	13	—	—	35,5	32,5	0,89	90,5		
3001/60	44,3	60	115—190 215—500	268—162 143—62	—	150	53,3	48,5	0,91	91	2 950	600
	36,8	50	1 000	31	—	—	45,2	40,7	0,90	90,5		
3001/75	55,2	75	115—190 215—500	353—202 187—77	—	162	60,3	60,3	0,91	91,5	2 950	720
	44,2	60	1 000	38	—	—	53,9	48,5	0,90	91		
3001/100	74	100	115—190 215—500	432—261 231—98	—	205	86	80	0,93	92	2 950	820
			1 000	50	—	—						
			2 000	26	—	—						
			3 000	16,5	—	—						

ПРИЛОЖЕНИЕ III.

Таблицы электродвигателей трехфазного и однофазного тока, выполняемых заводами Simens-Schuckertwerke (по данным 1929 г.).

Рабочие напряжения, к. п. д. и коэффициенты мощности электродвигателей соответствуют „Нормам союза германских электротехников“ и стандартам, приведенным в гл. I, 5. Все типы, кроме R8,4—R14; PR8,4—PR14; RE8,4—RE14—на роликовых подшипниках.

I. Трехфазные двигатели, с короткозамкнутым ротором защищенного типа от 0,08 до 7,5 kW.

Номинальная мощность		Т и п	Число оборо-	Линейный ток	Вес с нор-
kW	л. с.		тов около	статора при 380 V	мальным шквом
об./мин.					
А					
kg					
n = 3 000 оборотов в минуту					
0,08	0,11	R8,4-2	2 740	0,44 ¹⁾	4,3
0,125	0,17	R8,4-2	2 760	0,64 ¹⁾	7
0,2	0,27	R9,4-2	2 780	0,94 ¹⁾	8,5
0,33	0,45	R14-2	2 800	1,5 ¹⁾	11,5
0,5	0,68	R24-2	2 800	1,2	14
0,8	1,09	R34s-2	2 820	1,8	20
1,1	1,5	R34n-2	2 840	2,4	24
1,5	2,05	R44s-2	2 860	3,2	32
2,2	3	R44n-2	2 870	4,5	37
3	4,1	R54s-2	2 880	6,1	51
4	5,45	R54n-2	2 890	8,1	60
5,5	7,5	R64s-2	2 900	11	70
7,5	10,2	R64n-2	2 910	17,4	80
n = 1 500 оборотов в минуту					
0,08	0,11	R8,4-4	1 400	0,49 ¹⁾	7
0,125	0,17	R9,4-4	1 410	0,68 ¹⁾	8,5
0,2	0,27	R14-4	1 410	1 ¹⁾	11,5
0,33	0,45	R21-4	1 410	0,9	14
0,5	0,68	R34s-4	1 420	1,3	20
0,8	1 09	R34n-4	1 420	1,9	24
1,1	1,5	R44s-4	1 430	2,5	32
1,5	2,05	R44n-4	1 430	3,3	37
2,2	3	R54s-4	1 435	4,7	51
3	4,1	R54n-4	1 435	6,3	60
4	5,45	R64s-4	1 435	8,2	70
5,5	7,5	R64n-4	1 440	11,1	82
n = 1 000 оборотов в минуту					
0,125	0,17	R14-6	900	0,75 ¹⁾	11,5
0,2	0,27	R24-6	910	0,64	14
0,33	0,45	R34s-6	920	1	20
0,5	0,68	R34n-6	920	1,4	24
0,8	1,09	R44s-6	935	2,1	32
1,1	1,5	R44n-6	935	2,7	37
1,5	2,05	R54s-6	940	3,6	51
2,2	3	R54n-6	940	5,1	60
3	4,1	R64s-6	940	6,8	70
4	5,45	R64n-6	940	8,8	80

¹⁾ При 220 V.

II. Трехфазные двигатели с короткозамкнутым ротором открытого и защищенного типа от 4 до 100 kW.

Номинальная мощность		Т и п R — открытый VR — защищенный	Число оборотов около об./мин.	Линейный ток статора при 380 V А	Вес с нормальным шкивом	
kW	л. с.				открытый kg	защищенный kg
n = 3 000 оборотов в минуту						
7,5	10,2	76-2	2 890	14,9	115	122
11	15	96-2	2 900	21,5	135	143
15	20,5	116-2	2 910	29,5	168	180
22	30	126-2	2 920	42	215	230
30	41	136-2	2 920	57	290	305
40	54,5	156-2	2 930	76	395	415
n = 1 500 оборотов в минуту						
7,5	10,2	76-4	1 420	15,1	120	127
11	15	96-4	1 430	22	146	154
15	20,5	116-4	1 440	30	190	200
22	30	126-4	1 450	43	250	265
30	41	136-4	1 450	58	323	338
40	54,5	156-4	1 460	75	435	455
50	68	166-4	1 465	94	505	535
64	87	186-4	1 465	119	645	675
80	109	206-4	1 470	150	790	825
100	135	216-4	1 470	185	935	970
n = 1 000 оборотов в минуту						
5,5	7,5	76-6	935	11,7	118	125
7,5	10,2	96-6	945	15,6	143	150
11	15	116-6	950	22,5	185	197
15	20,5	126-6	960	31	245	260
22	30	136-6	960	44	315	332
30	41	156-6	965	59	427	447
40	54,5]	166-6	965	78	515	540
50	68	186-6	970	98	665	695
64	87	206-6	970	121	810	845
80	109	216-6	975	157	950	985
n = 750 оборотов в минуту						
4	5,45	76-8	695	9,3	115	122
5,5	7,5	96-8	700	12,2	139	147
7,5	10,2	116-8	710	16,4	183	195
11	15	126-8	710	23,5	240	255
15	20,5	136-8	720	31,5	311	325
22	30	156-8	720	45	420	440
30	41	166-8	725	60	505	530
40	54,5	186-8	725	79	655	685
50	68	216-8	725	98	795	837
64	87	216-8	730	123	935	970

III. Трехфазные двигатели с ротором, с контактными кольцами, открытого и защищенного типа, от 4 до 100 kW.

Номиналь- ная мощность		Т и п R—открыт. VR—защит	Число оборотов около об./мин.	Линейный ток статора при 380 V А	Напряжение ротора V	Ток ротора А	Вес с нор- мальным шкивом	
kW	л. с.						открыт.	защит.
							kg	kg
n = 3000 оборотов в минуту								
7,5	10,2	76-2	2890	15,8	185	26	122	130
11	15	96-2	2900	22,5	230	30	145	153
15	20,5	116-2	2910	29,5	270	35	160	192
22	30	126-2	2920	42	115	120	235	250
30	41	136-2	2920	57	175	140	315	330
40	54,5	156-2	2930	76	200	125	430	450
n = 1500 оборотов в минуту								
7,5	10,2	76-4	1420	15,8	140	35	128	135
11	15	96-4	1430	22,5	180	38	157	165
15	20,5	116-4	1440	30	285	33	202	214
22	30	126-4	1450	43	130	110	270	285
30	41	136-4	1450	58	150	125	348	363
40	54,5	156-4	1460	75	175	145	472	492
50	63	166-4	1465	94	205	155	550	560
64	87	186-4	1465	119	220	185	690	720
80	109	206-4	1470	150	250	200	845	880
90	135	216-4	1470	185	320	200	990	1025
n = 1000 оборотов в минуту								
5,5	7,5	76-6	935	12,2	150	24	126	132
7,5	10,2	96-6	945	16,3	170	28	151	162
11	15	116-6	950	23	280	25	198	210
15	20,5	126-6	960	31	90	110	265	280
22	30	136-6	960	44	135	105	342	357
30	41	156-6	965	59	160	120	464	484
40	54,5	166-6	965	78	180	140	560	585
50	68	186-6	970	96	205	155	710	740
64	87	206-6	970	121	220	180	865	900
80	109	216-6	975	151	285	180	1005	1040
n = 750 оборотов в минуту								
4	5,45	76-8	695	9,8	160	16	123	130
5,5	7,5	96-8	700	13	190	19	150	158
7,5	10,2	116-8	710	17	210	23	196	208
11	15	126-8	710	24	270	27	260	275
15	20,5	136-8	720	31,5	80	120	336	350
22	30	156-8	720	45	135	105	458	478
30	41	166-8	725	60	160	120	550	575
40	54,5	186-8	725	79	180	140	700	730
50	68	206-8	725	98	190	165	857	892
64	87	216-8	730	123	240	165	990	1025

IV. Однофазные двигатели с короткозамкнутым ротором и с ротором, с контактными кольцами, открытого и защищенного типа от 0,01 до 3,6 kW.

Номинальная мощность		Т и п	Число оборотов около об./мин.	Линейный ток статора при 220 V А	Напряжение ротора V	Ток ротора А	Вес kg
kW	л. с.						
3 000 об./мин., с короткозамкнутым ротором							
0,05	0,07	RE6,4-2	2 820	0,61	—	—	4,3
0,07	0,095	RE8,4-2	2 820	0,8	—	—	7
0,125	0,17	RE9,4-2	2 840	1,4	—	—	9
0,2	0,27	RE14-2	2 840	2	—	—	13
0,33	0,45	RE24-2	2 860	2,9	—	—	15
1 500 об./мин., с короткозамкнутым ротором							
0,04	0,055	RE3,4-4	1 400	0,6	—	—	7
0,07	0,095	RE9,4-4	1 400	0,95	—	—	9
0,11	0,15	RE14-4	1 410	1,4	—	—	13
0,18	0,25	RE24-4	1 410	2	—	—	15
0,3	0,41	RE34s-4	1 420	2,9	—	—	21
0,45	0,61	RE34n-4	1 430	4,1	—	—	20
0,7	0,95	RE44s-4	1 435	5,9	—	—	34
1	1,35	RE44n-4	1 440	7,8	—	—	35
1 000 об./мин., с короткозамкнутым ротором							
0,2	0,27	RE34s-6	910	2,3	—	—	21
0,3	0,41	RE34n-6	915	3,25	—	—	20
0,45	0,61	RE44s-6	920	4,4	—	—	34
0,7	0,95	RE44n-6	925	6,2	—	—	35
1	1,35	RE54s-6	930	8	—	—	53
1 500 об./мин., с ротором с контактными кольцами							
1	1,35	RE44n-4	1 410	8,7	85	13	44
1,3	1,75	RE54s-4	1 420	10	75	20	60
1,8	2,45	RE54n-4	1 425	14	90	29	71
2,4	3,25	RE 14s-4	1 430	17,5	100	27,5	84
3	4,1	RE64n-4	1 430	21,5	115	29	99
3,6	4,9	RE64b-4	1 430	25,5	135	30	115
1 000 об./мин., с ротором с контактными кольцами							
1,1	1,5	RE54n-6	930	9,5	90	13	73
1,5	2,05	RE64s-6	940	12	90	17,5	86
2	2,7	RE64n-6	950	16	100	17,5	99
2,5	3,4	RE64b-6	950	20	130	18	115

СОДЕРЖАНИЕ.

	Стр.
Предисловие ко 2-му изданию	3
Глава I. Общие данные для расчета асинхронных двигателей.	
1. Напряжение и частота	5
2. Число оборотов и число полюсов	6
3. Коэффициент полезного действия	—
4. Коэффициент мощности	9
5. Стандарты асинхронных двигателей	11
6. Линейная скорость на окружности ротора	18
7. Линейная нагрузка	20
8. Величина магнитной индукции в различных частях машины	21
9. Плотность тока в проводниках статора и ротора	—
10. Размеры и изоляции проводников статора и ротора	22
11. Нормы нагревания	33
12. Выбор типа двигателя	35
Глава II. Расчет статора и ротора.	
1. Нахождение основных размеров машины	36
2. Обмотки асинхронных моторов	41
А. Статорные обмотки.	
1. Обмотки переменного тока	—
а. Катушечные обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу	43
б. Катушечные обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу:	
а) обмотки, у которых u и p — числа взаимно простые	51
б) трехфазные обмотки с q — нечетному числу, при наличии u и p общего наибольшего делителя, равного 2	53
в) остальные симметричные трехфазные обмотки с дробным q	54
г) однофазные обмотки с пропущенными впадинами	—
д) трехфазные обмотки с пропущенными впадинами, если u и p — числа взаимно простые	55
е) другие симметр. трехфазные обмотки с 3 пропущенными впадинами ($t > 1$).	58
ж) трехфазные обмотки с числом пропущенных впадин > 3	60
в. Катушечные обмотки, состоящие из двух или нескольких параллельных ветвей	—
г. Стержневые обмотки с целым числом впадин на полюс и фазу	61
д. Стержневые обмотки с дробным числом впадин на полюс и фазу	62
е. Стержневые обмотки, состоящие из двух или нескольких параллельных ветвей	63
2. Обмотки постоянного тока	64
В. Роторные обмотки:	
а) обмотки переменного тока	66
б) обмотки постоянного тока	71
в) короткозамкнутые обмотки	—
С. Заключение	
3. Впадины и их изоляция	73
4. Определение величины воздушного промежутка	—
5. Определение действительной длины статора и ротора	76
6. Расчет обмотки статора	77

	Стр.
7. Расчет обмотки ротора:	
а) ротор с фазовой обмоткой (с кольцами)	79
б) ротор с короткозамкнутой обмоткой	81
8. Омическое сопротивление обмоток:	
а) обмотка статора	82
б) обмотка ротора:	
а) обмотка с кольцами	83
б) короткозамкнутая обмотка	—
9. Сопротивление короткого замыкания	84
10. Определение размеров роторных контактных колец и щеток	—

Глава III. Расчет магнитной цепи.

1. Определение величины магнитного потока	89
2. Определение теоретической величины воздушного промежутка	90
3. Определение высоты тела статора и ротора	91
4. Общий метод расчета магнитной цепи	—
5. Нахождение ампервитков для воздушного промежутка (AW_0)	94
6. Нахождение ампервитков для зубцов статора и ротора (AW_{zs} и AW_{zp})	—
7. Определение истинной величины τ_1 и истинных значений AW_1 , AW_{zs} , AW_{zp}	97
8. Нахождение ампервитков для тела статора и ротора (AW_s и AW_r)	98
9. Определение полного числа ампервитков (AW_k) и безымянной составляющей тока холостого хода	99

Глава IV. Ток короткого замыкания.

1. Индуктивное сопротивление обмоток:	
а) обмотка статора	99
б) обмотка ротора	103
2. Двойное рассеяние	104
3. Индуктивное сопротивление короткого замыкания	106
4. Полное сопротивление короткого замыкания, ток короткого замыкания и $\cos \varphi_k$	—

Глава V. Потери и ток холостого хода.

1. Потери на гистерезис:	
а) тело статора	109
б) зубцы статора	—
2. Потери на токи Фуко:	
а) тело статора	111
б) зубцы статора	—
3. Добавочные потери в железе:	
а) поверхностные потери	112
б) пульсационные потери	114
4. Потери на трение:	
а) контактные кольца	—
б) подшипники	115
в) трение о воздух	116
5. Омические потери в обмотке статора и ротора	117
6. Определение ваттной составляющей тока холостого хода	—
7. Сила тока холостого хода и $\cos \varphi_0$. Максимальная мощность. Коэффициент перегрузки	118

Глава VI. Круговые диаграммы и рабочие кривые.

1. Диаграмма магнитных полей и токов многофазных асинхронных двигателей	119
2. Диаграмма Heyland'a для трехфазных двигателей	124
3. Диаграмма Ossanni-Sumec'a для трехфазных двигателей	132
4. Диаграмма токов для однофазного двигателя	139
5. Диаграмма Heyland'a для однофазных двигателей	144
6. Диаграмма Ossanni-Sumec'a для однофазных двигателей	146
7. Рабочие кривые асинхронных двигателей	114

Глава VII. Нагревание асинхронных двигателей.

1. Нагревание статора	149
2. Нагревание ротора	151
3. Нагревание подшипников	153
4. Расчет искусственного охлаждения машины	—

Глава VIII. Аномальные конструкции асинхронных двигателей.

1. Совершенно закрытые двигатели	153
2. Двигатели для кратковременной работы	154

Глава IX. Определение веса машины и расчет отдельных частей машины на механическую прочность.

1. Определение веса машины:	
а) статор	155
б) ротор	—
с) активные веса	—
д) весовые отношения	—
2. Вал и цапфы:	
а) расчет вала для моторов, имеющих непосредственное сцепление с рабочей машиной	156
б) расчет вала для моторов, имеющих ременный шкив или зубчатую передачу	160
с) цапфы	—
3. Ременные шкивы и ремни	163
4. Дополнительные расчеты для турбомоторов:	
а) ротор	164
б) зубцы ротора	—
с) клинья ротора	165

Глава X. Расчет пусковых приспособлений.

1. Пусковые приспособления для трехфазных двигателей:	
а) пусковой трансформатор в цепи статора	166
б) пусковой реостат в цепи ротора	168
2. Пусковые приспособления для однофазных двигателей	170

Глава XI. Примеры расчета асинхронных двигателей.

1. Трехфазный двигатель, $P = 100$ kW, $E = 3\,000$ V, $n_s = 1\,000$ об./мин. Пусковой реостат	174
2. Однофазный двигатель, $P = 5$ kW, $E = 210$ V, $n_s = 1\,500$ об./мин. Пусковое приспособление	193

Приложения.

Приложение I. Таблицы для стержневых роторных обмоток	222
Приложение II. Таблицы электродвигателей трехфазного тока, изготовляемых на заводах ЛЭГ ^а	227
Приложение III. Таблицы электродвигателей трехфазного и однофазного тока заводов Siemens-Schuckertwerke	234