

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Методические рекомендации для  
самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

**Б1.В.08 Электрические машины**

**Направление подготовки** 35.03.06 Агроинженерия

**Профиль подготовки** «Электрооборудование и электротехнологии»

**Форма обучения** заочная

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Организация самостоятельной работы .....	3
2. Методические рекомендации по выполнению курсовой работы .....	4
2.1. Цели и задачи курсовой работы.....	4
2.2. Порядок и сроки выполнения курсовой работы.....	4
2.3. Структура курсовой работы.....	14
2.4. Требования к оформлению курсовой работы (проекта).....	14
3. Методические рекомендации по самостоятельному изучению вопросов ..	16
4. Методические рекомендации по подготовке к занятиям .....	72
4.1. Лабораторная работа №1 (ЛР-1) Генератор постоянного тока.....	72
4.2. Лабораторная работа №2 (ЛР-2) Двигатель постоянного тока.....	72
4.3. Лабораторная работа №3 (ЛР-3) Регулирование частоты вращения ДПТ.....	73
4.4. Лабораторная работа №4 (ЛР-4) Однофазные трансформатор и автотрансформатор.....	74
4.5. Лабораторная работа №5 (ЛР-5) Параллельная работа трансформаторов.....	74
4.6. Лабораторная работа №6 (ЛР-6) Несимметричные режимы работы трёхфазного трансформатора.....	75
4.7. Лабораторная работа №7 (ЛР-7) Трёхфазная асинхронная машина в режимах с заторможенным ротором.....	75
4.8. Лабораторная работа №8 (ЛР-8) Исследование АД с КЗР в режимах холостого хода и короткого замыкания.....	76
4.9. Лабораторная работа №9 (ЛР-9) Трёхфазный асинхронный электродвигатель в однофазном режиме.....	77
4.10. Лабораторная работа №10 (ЛР-10) Асинхронный генератор.....	77
4.11. Лабораторная работа №11 (ЛР-11) Испытание трёхфазного синхронного генератора.....	78

# 1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

- Организационно-методические данные дисциплины

№ п.п.	Наименование темы	Общий объем часов по видам самостоятельной работы (из табл. 5.1 РПД)				
		подготовка курсового проекта (работы)	подготовка реферата/эссе	индивидуальные домашние задания (ИДЗ)	самостоятельное изучение вопросов (СИБ)	подготовка к занятиям (ПкЗ)
1	2	3	4	5	6	7
1	<i>Машины постоянного тока: назначение, принцип действия и устройство</i>	-	-	-	7	5
2	<i>Основные электромагнитные и энергетические соотношения</i>	-	-	-	8	5
3	<i>Генераторы постоянного тока</i>	-	-	-	13	5
4	<i>Двигатели постоянного тока</i>	-	-	-	10	5
5	<i>Назначение, устройство и принцип действия трансформаторов</i>	-	-	-	2	3
6	<i>Рабочий процесс трансформатора</i>	-	-	-	2	4
7	<i>Устройство и особенности конструктивного выполнения 3-х фазных трансформаторов</i>	-	-	-	2	3
8	<i>Режимы работы трехфазных трансформаторов</i>	-	-	-	3	4
9	<i>Устройство и принцип действия асинхронных машин</i>	-	-	-	2	3
10	<i>Рабочий процесс, схема замещения, круговая диаграмма и характеристики АД</i>	-	-	-	2	4
11	<i>Пуск АД и регулирование частоты вращения</i>	-	-	-	2	4
12	<i>Специальные режимы асинхронных машин</i>	-	-	-	2	4
13	<i>Назначение, устройство и принцип действия синхронных машин</i>	9	-	-	5	4
14	<i>Рабочий процесс синхронного генератора</i>	9	-	-	2	5
15	<i>Параметры и характеристики СГ</i>	-	-	-	4	4
16	<i>Параллельная работа СГ с энергосистемой</i>	-	-	-	4	55

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

### 2.1 Цели и задачи курсовой работы.

Научиться осуществлять построение механической и рабочих характеристик асинхронной машины.

### 2.2 Порядок и сроки выполнения курсовой работы.

#### Задание для курсовой работы

1. Выбрать электродвигатель, соответствующий заданному варианту, и из приведённых ниже таблиц записать все его каталожные данные.

2. Осуществить расчёт всех его основных параметров, в предложенном ниже порядке выполнения задания и по результатам расчёта на листе формата A1 построить механическую и рабочие характеристики электродвигателя.

#### Исходные данные для курсовой работы

**Таблица 1. Каталожные данные электродвигателей.**

Вариант	Тип двигателя	$P_{ном}$	$U_1$	$n_{ном}$	$\eta_{ном}$	$\cos\varphi_{ном}$	$\mu_k$	$\mu_p$	$\mu_{min}$	$K_i$
1	4A71B2Y3	1100	220	2810	0,775	0,87	2,2	2	1,2	5,5
2	4A80A2Y3	1500	380	2850	0,81	0,85	2,2	2	1,2	6,5
3	4A80B2Y3	2200	380	2850	0,83	0,87	2,2	2	1,2	6,5
4	4A90L2Y3	3000	220	2840	0,845	0,88	2,2	2	1,2	6,5
5	4A100S2Y3	4000	380	2880	0,865	0,89	2,2	2	1,2	7,5
6	4A100L2Y3	5500	380	2880	0,875	0,91	2,2	2	1,2	7,5
7	4A112M2Y3	7500	220	2900	0,875	0,88	2,2	2	1	7,5
8	4A132M2Y3	11000	380	2900	0,88	0,9	2,2	1,6	1	7,5
9	4A160S2Y3	15000	220	2940	0,88	0,91	2,2	1,4	1	7,5
10	4A160M2Y3	18500	380	2940	0,885	0,92	2,2	1,4	1	7,5
11	4A180S2Y3	22000	380	2940	0,885	0,91	2,2	1,4	1	7,5
12	4A180M2Y3	30000	220	2945	0,905	0,9	2,2	1,4	1	7,5
13	4A200M2Y3	37000	380	2945	0,90	0,89	2,2	1,4	1	7,5
14	4A200L2Y3	45000	220	2945	0,91	0,9	2,2	1,4	1	7,5
15	4A225M2Y3	55000	380	2945	0,91	0,92	2,2	1,2	1	7,5
16	4A80A4Y3	1100	220	1420	0,75	0,81	2,2	2	1,6	5
17	4A80B4Y3	1500	220	1415	0,77	0,83	2,2	2	1,6	5
18	4A90L4Y3	2200	380	1425	0,80	0,83	2,2	2	1,6	6
19	4A100S4Y3	3000	380	1435	0,82	0,83	2,4	2,0	1,6	6,0
20	4A100L4Y3	4000	220	1430	0,84	0,84	2,4	2,0	1,6	6,0
21	4A112M4Y3	5500	220	1445	0,855	0,85	2,2	2,0	1,6	7
22	4A132S4Y3	7500	380	1455	0,875	0,86	3,0	2,2	1,7	7,5
23	4A132M4Y3	11000	380	1460	0,875	0,87	3,0	2,2	1,7	7,5
24	4A160M4Y3	18500	380	1465	0,895	0,88	2,3	1,4	1,0	7,0
25	4A180S4Y3	22000	220	1470	0,90	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5
26	4A180M4Y3	30000	380	1470	0,91	0,90	2,3	1,4	1,0	6,5
27	4A200M4Y3	37000	380	1475	0,91	0,9	2,5	1,4	1,0	7,0

28	4A200L4Y3	45000	220	1475	0.92	0.9	2.5	1.4	1.0	7.0
29	4A225M4Y3	55000	380	1480	0.925	0.90	2.5	1.3	1.0	7.0
30	4A250S4Y3	75000	220	1480	0.93	0.90	2.3	1.2	1.0	7.0
31	4A180M6Y3	18500	380	975	0.880	0.87	2.0	1.2	1.0	5
32	4A200M6Y3	22000	220	975	0.900	0.90	2.4	1.3	1.0	6.5
33	4A200L6Y3	30000	380	980	0.905	0.900	2.4	1.3	1.0	6.5
34	4A250S6Y3	45000	220	985	0.915	0.89	2.1	1.2	1.0	6.5
35	4A250M6Y3	55000	380	985	0.915	0.89	2.1	1.2	1.0	6.5
36	4A280S6Y3	75000	380	985	0.920	0.89	2.2	1.4	1.2	5.5
37	4A280M6Y3	90000	380	985	0.925	0.89	2.2	1.4	1.2	5.5
38	4A315S6Y3	11000 0	380	985	0.930	0.90	2.2	1.4	0.9	6.5
39	4A315M6Y3	13200 0	380	985	0.935	0.90	2.2	1.4	0.9	6.5
40	4A355S6Y3	16000 0	380	985	0.935	0.90	2.2	1.4	0.9	6.5

**Таблица 2. Коэффициенты полезного действия и мощности при различных нагрузках**

Вариант	Тип двигателя	$\eta$ в % при $P_2/P_{1ном}$ в %					$\cos \phi$ в % при $P_2/P_{1ном}$ в %				
		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
1	4A71B2Y3	0.76	0.7950	0.795	0,775	0.730	0.50	0.73	0.82	0,87	0.89
2	4A80A2Y3	0.73	0.805	0.815	0,81	0.790	0.46	0.70	0.80	0,85	0.87
3	4A80B2Y3	0.770	0.830	0.835	0,83	0.81	0.51	0.73	0.83	0,87	0.89
4	4A90L2Y3	0.800	0.855	0.855	0.845	0.820	0.58	0.78	0.85	0,88	0.89
5	4A100S2Y3	0.800	0.880	0.880	0,865	0.850	0.600	0.800	0.860	0.89	0.90
6	4A100L2Y3	0.825	0.875	0.880	0.875	0.860	0.65	0.83	0.88	0.91	0.91
7	4A112M2Y3	0.780	0.855	0.875	0.875	0.865	0.56	0.74	0.83	0.88	0.89
8	4A132M2Y3	0.800	0.870	0.880	0.880	0.870	0.65	0.82	0.87	0.9	0.9
9	4A160S2Y3	0.800	0.865	0.880	0.880	0.870	0.68	0.84	0.89	0.91	0.91
10	4A160M2Y3	0.82	0.875	0.885	0.885	0.87	0.72	0.86	0.90	0.92	0.92
11	4A180S2Y3	0.79	0.8	0.885	0.885	0.88	0.65	0.82	0.88	0.91	0.92
12	4A180M2Y3	0.82	0.885	0.905	0.905	0.89	0.66	0.82	0.83	0.9	0.9
13	4A200M2Y3	0.81	0.875	0.9	0.9	0.895	0.67	0.82	0.87	0.8	0.89
14	4A200L2Y3	0.83	0.89	0.91	0.91	0.905	0.71	0.85	0.89	0.9	0.91
15	4A225M2Y3	0.825	0.895	0.910	0.91	0.905	0.78	0.89	0.91	0.92	0.92
16	4A80A4Y3	0.640	0.740	0.760	0,75	0.72	0.38	0.59	0.73	0,81	0.85
17	4A80B4Y3	0.700	0.78	0.735	0.77	0.730	0.41	0.63	0.76	0.83	0.86
18	4A90L4Y3	0.740	0.810	0.815	0.80	0.765	0.42	0.64	0.76	0.83	0.85
19	4A100S4Y3	0.755	0.820	0.830	0.82	0.795	0.43	0.65	0.77	0.83	0.85
20	4A100L4Y3	0.795	0.847	0.850	0.84	0.815	0.46	0.63	0.79	0.84	0.86
21	4A112M4Y3	0.820	0.855	0.865	0.855	0.630	0.51	0.72	0.80	0.85	0.86
22	4A132S4Y3	0.775	0.860	0.875	0.875	0.860	0.53	0.71	0.83	0.86	0.87
23	4A132M4Y3	0.800	0.860	0.880	0.875	0.870	0.56	0.75	0.84	0.87	0.88
24	4A160M4Y3	0.87	0.905	0.905	0.895	0.875	0.65	0.82	0.86	0.88	0.86
25	4A180S4Y3	0.855	0.895	0.90	0.90	0.87	0.55	0.82	0.87	0.90	0.89
26	4A180M4Y3	0.87	0.905	0.91	0.91	0.89	0.56	0.83	0.88	0.89	0.89
27	4A200M4Y3	0.87	0.905	0.91	0.91	0.90	0.67	0.84	0.89	0.90	0.90
28	4A200L4Y3	0.885	0.92	0.925	0.92	0.91	0.69	0.85	0.89	0.90	0.90

29	4A225M4Y3	0,885	0,920	0,925	0,925	0,915	0,68	0,84	0,89	0,90	0,90
30	4A250S4Y3	0,886	0,92	0,93	0,98	0,925	0,69	0,84	0,88	0,90	0,90
31	4A180M6Y3	0,885	0,880	0,880	0,88	0,85	0,47	0,72	0,81	0,85	0,85
32	4A200M6Y3	0,88	0,895	0,895	0,885	0,835	0,56	0,77	0,84	0,87	0,87
33	4A200L6Y3	0,885	0,91	0,91	0,905	0,88	0,63	0,80	0,85	0,88	0,88
34	4A250S6Y3	0,896	0,92	0,92	0,94	0,89	0,62	0,88	0,85	0,87	0,83
35	4A250M6Y3	0,885	0,925	0,93	0,925	0,91	0,57	0,77	0,84	0,87	0,87
36	4A280S6Y3	0,9	0,93	0,93	0,93	0,92	0,57	0,78	0,84	0,87	0,87
37	4A280M6Y3	0,925	0,94	0,935	0,925	0,905	0,73	0,85	0,88	0,80	0,87
38	4A315S6Y3	0,93	0,94	0,935	0,925	0,915	0,7	0,85	0,88	0,89	0,87
39	4A315M6Y3	0,935	0,945	0,94	0,98	0,91	0,75	0,87	0,80	0,89	0,85
40	4A355S6Y3	0,94	0,95	0,945	0,935	0,915	0,75	0,87	0,8	0,89	0,85

**Таблица 3. Параметры схемы замещения электродвигателей (сопротивления даны в относительных единицах)**

Вариант	Типоразмер электродвигателя	$X_{\mu}$	В номинальном режиме				При КЗ		
			$R_1'$	$X_1'$	$R_2''$	$X_2''$	$R_{2п}''$	$R_{кп}$	$X_{кп}$
1	4A71B2Y3	2,8	0,13	0,054	0,069	0,084	0,07	0,2	0,11
2	4A80A2Y3	2,5	0,084	0,051	0,049	0,081	0,050	0,13	0,099
3	4A80B2Y3	2,7	0,076	0,05	0,049	0,087	0,050	0,13	0,098
4	4A90L2Y3	3,4	0,072	0,057	0,047	0,1	0,048	0,12	0,11
5	4A100S2Y3	3,4	0,054	0,055	0,036	0,099	0,038	0,091	0,11
6	4A100L2Y3	3,8	0,050	0,054	0,036	0,11	0,038	0,087	0,1
7	4A112M2Y3	3,7	0,046	0,058	0,028	0,14	0,032	0,077	0,15
8	4A132M2Y3	4,2	0,04	0,061	0,025	0,12	0,028	0,068	0,12
9	4A160S2Y3	4,0	0,052	0,082	0,022	0,12	0,029	0,081	0,16
10	4A160M2Y3	4,5	0,049	0,092	0,022	0,12	0,031	0,079	0,16
11	4A180S2Y3	3,6	0,039	0,091	0,020	0,11	0,023	0,065	0,15
12	4A180M2Y3	3,8	0,030	0,073	0,018	0,11	0,024	0,054	0,13
13	4A200M2Y3	4,1	0,029	0,084	0,021	0,12	0,031	0,060	0,16
14	4A200L2Y3	4,9	0,027	0,088	0,020	0,13	0,031	0,058	0,15
15	4A225M2Y3	6,6	0,026	0,092	0,029	0,12	0,029	0,055	0,16
16	4A80A4Y3	1,7	0,12	0,078	0,068	0,12	0,071	0,20	0,14
17	4A80B4Y3	1,9	0,12	0,078	0,060	0,12	0,072	0,19	0,15
18	4A90L4Y3	2,1	0,098	0,076	0,060	0,13	0,068	0,016	0,14
19	4A100S4Y3	2,2	0,078	0,079	0,058	0,13	0,057	0,14	0,14
20	4A100L4Y3	2,4	0,067	0,079	0,063	0,14	0,056	0,13	0,15
21	4A112M4Y3	2,8	0,054	0,078	0,041	0,13	0,048	0,11	0,14
22	4A132S4Y3	3,0	0,046	0,085	0,033	0,13	0,040	0,088	0,15
23	4A132M4Y3	3,2	0,043	0,085	0,032	0,13	0,039	0,082	0,15
24	4A160M4Y3	4,3	0,042	0,056	0,024	0,13	0,037	0,079	0,14
25	4A180S4Y3	4,0	0,041	0,060	0,021	0,12	0,034	0,076	0,15
26	4A180M4Y3	3,9	0,034	0,058	0,018	0,12	0,031	0,064	0,13
27	4A200M4Y3	4,4	0,039	0,066	0,018	0,14	0,035	0,074	0,16
28	4A200L4Y3	4,6	0,034	0,082	0,017	0,14	0,034	0,062	0,16
29	4A225M4Y3	4,2	0,027	0,086	0,015	0,14	0,030	0,056	0,15
30	4A250S4Y3	4,4	0,025	0,080	0,014	0,11	0,027	0,052	0,15
31	4A180M6Y3	3,4	0,054	0,12	0,028	0,14	0,040	0,11	0,20
32	4A200M6Y3	3,1	0,056	0,11	0,026	0,13	0,047	0,1	0,18
33	4A200L6Y3	3,5	0,054	0,11	0,024	0,14	0,044	0,095	0,17
34	4A250S6Y3	3,8	0,047	0,12	0,022	0,15	0,042	0,080	0,18
35	4A250M6Y3	3,3	0,037	0,089	0,015	0,14	0,032	0,059	0,16
36	4A280S6Y3	3,4	0,031	0,083	0,014	0,14	0,032	0,062	0,15
37	4A280M6Y3	3,4	0,032	0,12	0,021	0,13	0,046	0,077	0,19
38	4A315S6Y3	3,8	0,032	0,12	0,022	0,14	0,049	0,082	0,20

39	4A315M6Y3	3,4	0,026	0,12	0,017	0,14	0,045	0,071	0,19
40	4A355S6Y3	3,7	0,023	0,11	0,016	0,14	0,045	0,068	0,18

### Общие сведения об механической и рабочих характеристиках асинхронной машины

Векторные уравнения напряжений и токов, описывающие электромагнитные процессы в асинхронном электродвигателе, позволяют найти эквивалентную схему замещения, в которой магнитная связь между обмотками статора и ротора замещена электрически связанными цепями. Такой схемой является Т-образная схема, представленная на нижеследующем рисунке. Расчёт такой схемы осуществляется общепринятыми методами в соответствии с теорией электрических цепей. В ней  $r_1$  и  $x_1$  соответственно активное и реактивное сопротивления обмотки статора,  $r_2'$  и  $x_2'$  приведённые к обмотке статора активное и реактивное сопротивления обмотки ротора,  $r_2'(1-s)/s$  переменное сопротивление, имитирующее нагрузку,  $r_\mu$  и  $x_\mu$  активное и реактивное сопротивления намагничивающей цепи.

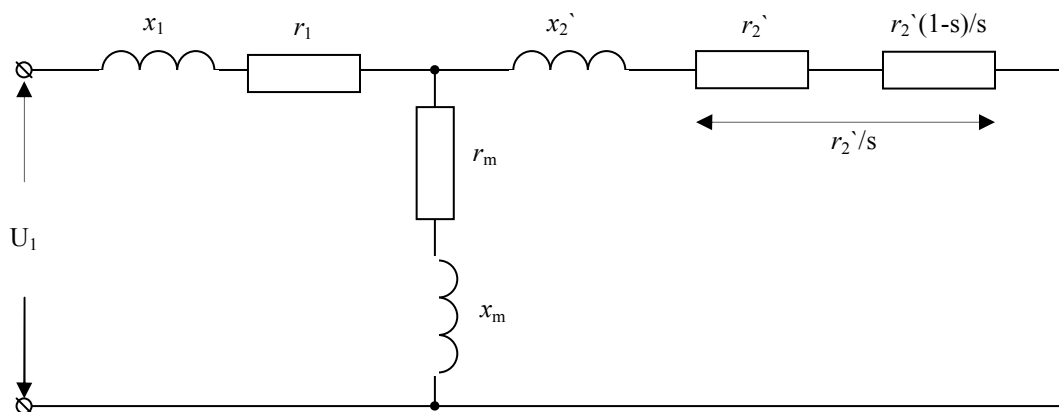


Рис. Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует. 3.1 Т-образная схема замещения асинхронного электродвигателя.

Однако наиболее удобной для расчёта и анализа является Г-образная схема с вынесенным на зажимы электродвигателя намагничивающим контуром. Такая схема представлена на рисунке 2.3.2. Чтобы сохранить эквивалентность Т-образной схеме, в ней сопротивления скорректированы на величину, мало отличающуюся от 1, коэффициента  $s_1 = 1 - r_1/x_\mu$ . Поэтому схема называется уточнённой.

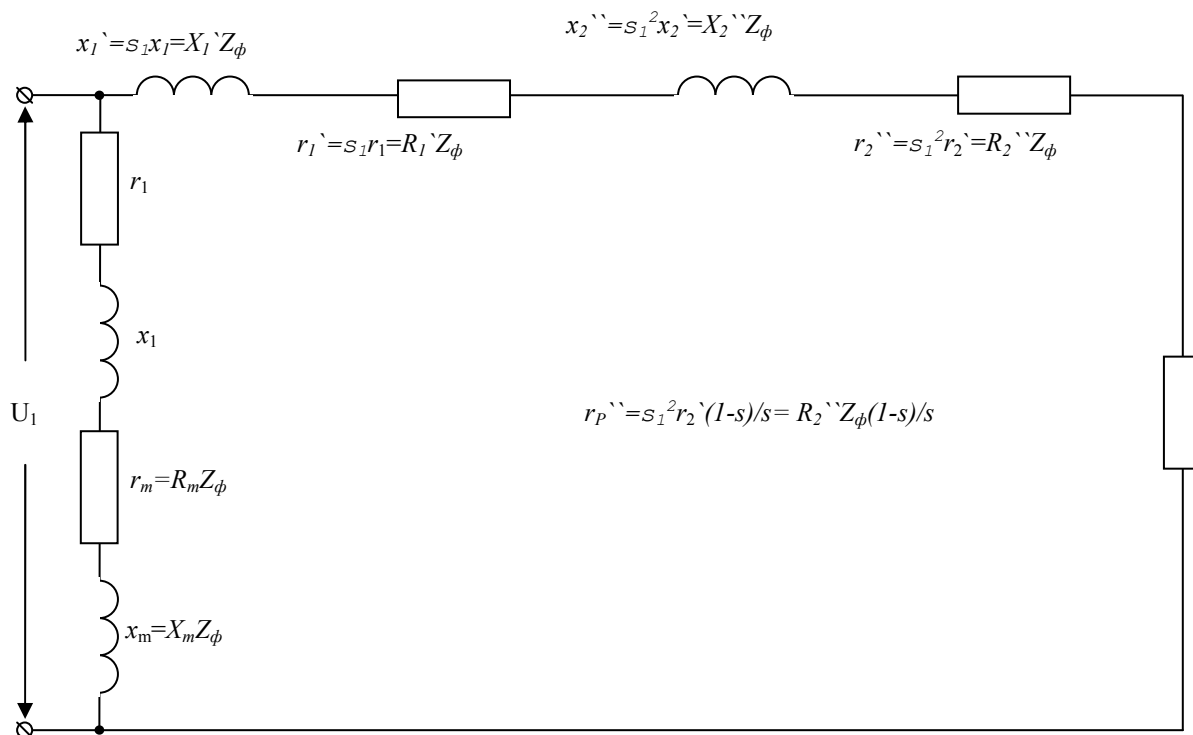


Рис. **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**3.2 Уточнённая Г-образная схема замещения асинхронного двигателя.

Данная схема становится ещё более удобной для анализа, если две её последовательные цепи заменить по известным законам электротехники на эквивалентные параллельные. С помощью полученной схемы легко определяются активные и реактивные токи и мощности на любом участке цепи.

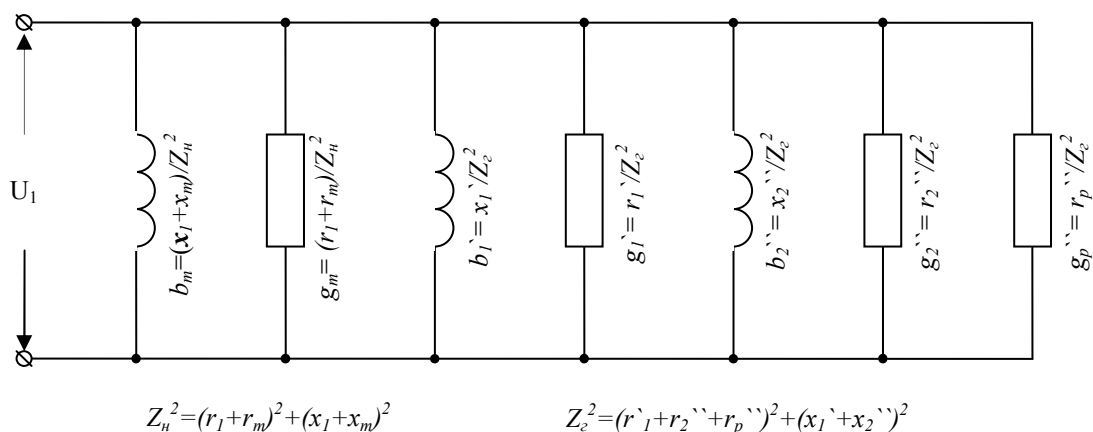


Рис. **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**3.3. Уточнённая Г-образная схема замещения асинхронного электродвигателя, представленная в виде проводимостей.

### Порядок выполнения задания

Определяем число пар полюсов по марке электродвигателя



*p* = вместо данного текста вписать собственноручно чернилами результат и так в каждой формуле.

Активное сопротивление намагничивающего контура определяем с учётом диапазона изменения его относительного значения в пределах от 0,1 до 0,4 [Л-1, стр. 155]

$$R_{\mu} = (X_{\mu}/5) - 0.4 = \text{формула с цифрами} = \text{результат.}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..1)**

Находим частоту вращения магнитного поля статора (синхронную частоту вращения)

$$n_1 = \text{формула (11.1) стр. 130 [1]} = \text{формула с цифрами} = \text{результат, об/мин.}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..2)**

Далее последовательно находим:

-синхронную угловую скорость

$$\omega_1 = \text{формула на стр. 59 [1]} = \text{формула с цифрами} = \text{результат, 1/с;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..3)**

-номинальную угловую скорость

$$\omega_{НОМ} = \text{формула на стр 59 [1]} = \text{, 1/с;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..4)**

-номинальное скольжение

$$s_{НОМ} = [1, \text{стр. 131, 164}] = \text{;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..5)**

-критическое скольжение

$$s_k = [1, \text{стр. 164}] = \text{;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..6)**

-номинальный момент

$$M_{НОМ} = [1, \text{стр. 59, 164}] = \text{Нм;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..7)**

-максимальный (критический) момент

$$M_K = M_{МАХ} = [1, \text{стр. 166}] = \text{Нм;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..8)**

-мощность, потребляемую из сети в номинальном режиме

$$P_{1НОМ} = \text{воспользоваться формулой (13.18) [1]} = \text{Вт;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..9)**

-номинальный ток статора

$$I_{1НОМ} = \text{воспользоваться формулой на стр. 152 или стр. 175 [1]} = \text{А;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..10)**

-пусковой ток при номинальном напряжении на зажимах электродвигателя

$$I_{П} = \text{воспользоваться формулой на стр. 175 [1]} = \text{А;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..11)**

-полное сопротивление фазы электродвигателя при номинальном режиме

$$Z_{\Phi} = Z_B = \text{воспользоваться формулой на стр. 155 [1]} = \text{Ом;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..12)**

-активное сопротивление намагничивающей цепи в именованных единицах по его относительной к базисному сопротивлению величине

$$r_{\mu} = \text{воспользоваться рекомендацией на стр. 155 [1]} = \text{Ом;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..13)**

-индуктивное сопротивление намагничивающей цепи в именованных единицах по его относительной к базисному сопротивлению величине

$$x_{\mu} = \text{аналогично предыдущему} = \text{Ом;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..14)**

-уточнённое активное сопротивление Г-образной схемы цепи статора

$$r_1 = \text{аналогично предыдущему} = \text{Ом;}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..15)**

-уточнённое индуктивное сопротивление Г-образной схемы цепи статора

$x_1' = \text{аналогично предыдущему} = , \text{ Ом};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..16)**

-уточнённое активное сопротивление Г-образной схемы цепи ротора, приведённое к цепи статора

$r_2'' = \text{аналогично предыдущему} = , \text{ Ом};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..17)**

-уточнённое индуктивное сопротивление Г-образной схемы цепи ротора, приведённое к цепи статора

$x_2'' = \text{аналогично предыдущему} = , \text{ Ом};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..18)**

-активное сопротивление короткого замыкания с учётом насыщения

$r_{кп} = \text{аналогично предыдущему} = , \text{ Ом};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..19)**

-реактивное сопротивление короткого замыкания с учётом насыщения

$x_{кп} = \text{аналогично предыдущему} = , \text{ Ом};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..20)**

-полное сопротивление короткого замыкания с учётом насыщения

$z_{кп} = \text{по треугольнику сопротивлений} = , \text{ Ом};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..21)**

-пусковой ток с учётом насыщения

$I_{кп} = \text{по закону Ома} = , \text{ А};$

-критическое скольжение в режиме электродвигателя

$s_{кд} = \text{воспользоваться формулой (15.5) на стр. 161 [1]} = ,$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..22)**

-критическое скольжение в режиме генератора

$s_{кг} = \text{воспользоваться формулой (15.5) на стр. 161 [1]} = ,$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..23)**

-критический момент в режиме электродвигателя

$M_{кд} = \text{воспользоваться формулой (15.7) на стр. 161 [1]} = , \text{ Нм};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..24)**

-критический момент в режиме генератора

$M_{кг} = \text{воспользоваться формулой (15.7) на стр. 161 [1]} = , \text{ Нм};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..25)**

-относительная величина индуктивного сопротивления обмотки статора (при Т-образной схеме замещения)

$$X_1 \approx \frac{2X_\mu X_1'}{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4X_\mu X_1'}} = ,$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..26)**

-именованная величина индуктивного сопротивления обмотки статора (при Т-образной схеме замещения)

$x_1 = \text{воспользоваться рекомендацией на стр. 155 [1]} = , \text{ Ом};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..27)**

-относительная величина активного сопротивления обмотки статора (при Т-образной схеме замещения)

$$R_1 = R_1' X_1' / X_1 = ,$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..28)**

-именованная величина активного сопротивления обмотки статора (при Т-образной схеме замещения)

$$r_1 = \text{воспользоваться рекомендацией на стр. 155 [1]} = , \text{ Ом} ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..29)**

-квадрат полного сопротивления цепи намагничивания

$$z_{\mu}^2 = (r_1 + r_{\mu})^2 + (x_1 + x_{\mu})^2 = , \text{ Ом}^2 ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..30)**

-индуктивная проводимость цепи намагничивания

$$b_{\mu} = \frac{x_1 + x_{\mu}}{z_{\mu}^2} = , \text{ См}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..31)**

-активная проводимость цепи намагничивания

$$g_{\mu} = \frac{r_1 + r_{\mu}}{z_{\mu}^2} = , \text{ См}$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..32)**

-активная составляющая намагничивающего тока

$$I_{\mu a} = U_1 g_{\mu} = , \text{ А} ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..33)**

-реактивная составляющая намагничивающего тока

$$I_{\mu p} = U_1 b_{\mu} = , \text{ А} ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..34)**

-мощность потерь активной энергии в стали (магнитные потери)

$$\Delta P_c = \Delta P_m = 3U_1^2 g_{\mu} = , \text{ Вт} .$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..35)**

Приняв скольжение равным номинальному скольжению  $s=s_{ном}$ , последовательно определим:

-активное сопротивление, имитирующее нагрузку, приведённое к цепи статора, [1, стр. 154]

$$r_p'' = \frac{r_2''(1-s)}{s} = , \text{ Ом} ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..36)**

-квадрат полного сопротивления главной цепи Г-образной схемы замещения

$$z_c^2 = (r_1' + r_2'' + r_p'')^2 + (x_1' + x_2'')^2 = , \text{ Ом}^2 ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..37)**

-реактивную (индуктивную) проводимость обмотки статора для Г-образной схемы замещения

$$b_1' = \frac{x_1'}{z_c^2} = , \text{ См} ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..38)**

-активную проводимость обмотки статора для Г-образной схемы замещения

$$g_1' = \frac{r_1'}{z_c^2} = , \text{ См} ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..39)**

-реактивную (индуктивную) проводимость обмотки ротора для Г-образной схемы замещения

$$b_2'' = \frac{x_2''}{z_c^2} = , \text{ См} ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..40)**

-активную проводимость обмотки ротора для Г-образной схемы замещения

$$g_2'' = \frac{r_2''}{z_c^2} = , \text{ См} ;$$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..41)**

-активную проводимость, имитирующую нагрузку для Г-образной схемы замещения

$$g_p = \frac{r_p}{z_s^2} = , \text{ См};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..42)

-активную составляющую тока электродвигателя

$$I_a = U_1(g_\mu + g_1 + g_2 + g_p) = , \text{ А};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..43)

-реактивную составляющую тока электродвигателя

$$I_p = U_1(b_\mu + b_1 + b_2) = , \text{ А};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..44)

-действующее значение тока электродвигателя

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = , \text{ А};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..45)

-активную мощность на зажимах электродвигателя

$$P_1 = 3U_1I_a = , \text{ Вт};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..46)

-реактивную мощность на зажимах

$$Q_1 = 3U_1I_p = , \text{ ВАр};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..47)

-полную мощность

$$S = 3U_1I = , \text{ ВА};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..48)

-электрические потери в обмотке статора

$$\Delta P_{\Sigma 1} = 3U_1^2 g_1 = , \text{ Вт};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..49)

-электромагнитную мощность

$$P_{\Sigma M} = P_1 - \Delta P_c - \Delta P_{\Sigma 1} = , \text{ Вт};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..50)

-электрические потери в обмотке ротора

$$\square P_{\Sigma 2} = 3\square I^2 \square_2 = , \text{ Вт};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..51)

-механическую мощность

$$P_{MEX} = \text{по известным } P_{\Sigma Mi} \square P_{\Sigma 2} = , \text{ Вт};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..52)

-или для проверки

$$P_{MEX} = \text{по известным } \square I \text{ и } \square_p = , \text{ Вт};$$

-частоту вращения ротора

$$\square_2 = \text{по известным } \square I \text{ и } \square = , \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..53)

-угловую скорость

$$\square_2 = \text{по известной } \square_2 = , \frac{1}{\text{с}};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..54)

-механические потери, равные потерям в стали при синхронной частоте вращения ротора и пропорциональные действительной частоте вращения ротора

$$\square P_{MEX} = \square P_M \square_2 / \square I = , \text{ Вт};$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..55)

-мощность на валу (полезную мощность)

$P_2 = \text{по известным } P_{\text{МЭХ}} \text{ и } \eta_{\text{МЭХ}} = \dots, \text{ Вт};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..56)**

-коэффициент полезного действия

$\eta = \text{по известным } P_1 \text{ и } P_2 = \dots;$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..57)**

-коэффициент мощности

$C_{\eta} = \text{по известным } P_1 \text{ и } \eta = \dots;$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..58)**

-электромагнитный момент

$M_{\text{ЭМ}} = \text{по известным } P_2 \text{ и } \eta = \dots, \text{ Нм};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..59)**

или для проверки

$M_{\text{ЭМ}} = \text{по известным } P_{\text{ЭМ}} \text{ и } \eta = \dots, \text{ Нм};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..60)**

-момент на валу (полезный момент)

$M = \text{по известным } P_2 \text{ и } \eta = \dots, \text{ Нм};$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..61)**

По полученным значениям мощности и момента на валу, мощности на зажимах электродвигателя и частоты вращения в именованных единицах определяем их относительные значения

$P_{2*} = P_2 / P_{2\text{НОМ}} = \dots;$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..62)**

$M_* = M / M_{\text{НОМ}} = \dots;$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..63)**

$P_{1*} = P_1 / P_{2\text{НОМ}} = \dots;$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..64)**

$\eta_{2*} = \eta_2 / \eta_1 = \dots.$

**(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..65)**

Действия по выражениям (4.37....4.66) произвести и для других скольжений, указанных в первом столбце нижеследующей таблицы.

## Таблица Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..1

Результаты расчёта параметров электродвигателя

№ п/п	s	P <sub>2*</sub>	P <sub>1*</sub>	η	Cosφ	n <sub>2*</sub>	M*	n <sub>2</sub>	M
1	1.2								
2	0.99								
3	0.6+0.4s <sub>k</sub>								
4	0.3+0.7s <sub>k</sub>								
5	0.1+0.9s <sub>k</sub>								
6	s <sub>k</sub>								
7	0.5s <sub>k</sub>								
8	1.3s <sub>НОМ</sub>								
9	1.15s <sub>НОМ</sub>								
10	s <sub>НОМ</sub>								
11	0.7s <sub>НОМ</sub>								
12	0.4s <sub>НОМ</sub>								
13	0.1s <sub>НОМ</sub>								
14	-s <sub>НОМ</sub>								
15	-0.5s <sub>k</sub>								
16	-s <sub>k</sub>								
17	-0,1-0,9s <sub>k</sub>								
18	-0,3-0,7s <sub>k</sub>								
19	-0,6-0,4s <sub>k</sub>								

По результатам расчёта строим механическую  $M=f(n_2)$  характеристику и рабочие  $(s, \eta, \text{Cos}\varphi, P_{1*}, n_{2*}, M*) = f(P_{2*})$  характеристики. *Рабочие характеристики построить по точкам в диапазоне изменения  $P_{2*}$  от минимального положительного значения до 1,2...1,3  $P_{2*}$ .*

На полученных графиках нанести характерные точки+и по номинальным данным электродвигателя (пусковой, номинальный, минимальный и критический моменты, коэффициент полезного действия и коэффициент мощности при номинальном скольжении). Оценить степень отклонения этих величин от полученных расчётным путём.

### 2.3. Структура курсовой работы:

- титульный лист;
- содержание;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список использованной литературы;
- приложения.

### 2.4. Требования к оформлению курсовой работы (проекта).

Страницы текста работы должны соответствовать формату А4 ГОСТ 9327. Текст должен быть выполнен с использованием компьютера и принтера на одной стороне листа белой бумаги через полуторный интервал. Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, цифр и других знаков должна составлять 14 пунктов (кегель 14), форматирование текста по ширине, заголовков — по центру. При использовании текстового редактора Microsoft Word рекомендуется использовать стандартную гарнитуру шрифта Times New Roman. Текст следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: левое – 3 см, правое

– 1,5 см, верхнее – 2 см, нижнее – 2 см. Абзацный отступ – 1,25 см. Условные графические обозначения в электрических схемах должны отвечать действующим требованиям ЕСКД. В конце работы указываются использованные учебники и учебные пособия, использованные для выполнения курсовой работы.

Работа должна быть подписана с указанием даты ее окончания.

Исходные данные выбираются на основании номера варианта (по первой и второй цифре варианта), выданного преподавателем.

## 2.5 Критерии оценки:

№	Критерии оценки	Макс. балл
1	соблюдение сроков сдачи работы	5
2	правильность оформления работы	5
3	грамотность структурирования работы	5
4	наличие иллюстрирующего(расчетного) материала	5
5	использование современной литературы	5
6	использование зарубежной литературы	5
7	актуальность темы	5
8	сбалансированность разделов работы	5
9	правильная формулировка целей и задач	10
10	соответствие содержания заявленной теме	10
11	практическая значимость результатов	10
12	степень самостоятельности выполнения	10
13	наличие элементов научного исследования	10
14	умение докладывать результаты	10
	ИТОГО:	100

## 2.6 Рекомендованная литература.

### 2.6.1 Основана литература:

1. Копылов, И.П. Электрические машины [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Издательство Юрайт. – 2012 г. – 675 с..

### 2.6.2 Дополнительная литература:

- Осин, И.Л. Электрические машины. Синхронные машины [Текст] / И.Л. Осин, Ю.Г. Шакарян. – М.: Высшая школа. – 1990 г. – 304 с.
- Сукманов В.И. Электрические машины и аппараты [Текст]. – М.: Колос, 2001.

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

#### 3.1 Назначение и принцип действия. Устройство и магнитная цепь машины постоянного тока. Обмотки якоря машин постоянного тока.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Машина постоянного тока — электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии в электрическую постоянного тока (генератор) или для обратного преобразования (двигатель). Машина постоянного тока обратима.

Машина постоянного тока образуется из синхронной обращённой конструкции, если её якорь снабдить коллектором, который в генераторном режиме играет роль выпрямителя, а в двигательном — преобразователя частоты. Благодаря наличию коллектора по обмотке якоря проходит переменный ток, а во внешней цепи, связанной с якорем, — постоянный.

Различают следующие виды машин постоянного тока:

1. По наличию коммутации:
  - 3 с коммутацией (обычные);
  - 4 без коммутации (униполярный генератор и униполярный электродвигатель);
2. По типу переключателей тока:
  - 5 с коллекторными переключателями тока (с щёточно-коллекторным переключателем);
  - 6 с бесколлекторными переключателями тока (с электронным переключателем (вентильный электродвигатель)).
3. По мощности:
  - микромашины — до 500 Вт;
  - малой мощности — 0,5-10 кВт;
  - средней мощности — 10-200 кВт;
  - большой мощности — более 200 кВт.
4. В зависимости от частоты вращения:
  - тихоходные — до 300 об./мин.;
  - средней быстроходности — 300—1500 об./мин.;
  - быстроходные — 1500-6000 об./мин.;
  - сверхбыстроходные — более 6000 об./мин.
5. По расположению вала:
  - горизонтальные;
  - вертикальные.

#### Принцип действия

Машина постоянного тока может работать в двух режимах: двигательном и генераторном, в зависимости от того, какую энергию к ней подвести — если электрическую, то электрическая машина будет работать в режиме электродвигателя, а если механическую — то будет работать в режиме генератора. Однако электрические машины, как правило, предназначены заводом изготовителем для одного определенного режима работы — или в режиме генератора, или электродвигателя.

#### Электродвигатель.

Электродвигатели постоянного тока стоят почти на каждом автомобиле — это стартер, электропривод стеклоочистителя, вентилятор отопителя салона и др.

В роли индуктора выступает статор, на котором расположена обмотка. На неё подаётся постоянный ток, в результате чего вокруг неё создаётся постоянное магнитное поле. Обмотка ротора состоит из проводников, запитанных через коллектор. В результате



на них действуют пары сил Ампера, которые вызывают вращающий момент. Направление сил определяется по правилу «буравчика». Однако этот вращающий момент способен повернуть ротор только на 180 градусов, после чего он остановится. Чтобы это предотвратить, используется щёточно-коллекторный узел, выполняющий роль переключателя полюсов и датчика положения ротора (ДПР).

Генератор[править].

В генераторе индуктором также является статор, создающий постоянное магнитное поле между соответствующими полюсами. При вращении ротора, в проводниках обмотки якоря, перемещающихся в магнитном поле, по закону электромагнитной индукции наводится ЭДС, направление которой определяется по правилу правой руки. Переменная ЭДС обмотки якоря выпрямляется с помощью коллектора, через неподвижные щетки, посредством которых обмотка соединяется с внешней сетью.

Автомобильные генераторы постоянного тока стояли на старых автомобилях (ГАЗ-51, ГАЗ-69 и др.), с 1970-х гг. вытеснены генераторами переменного трёхфазного тока с трёхфазным выпрямителем на шести диодах по схеме академика Ларионова.

### **3.2 ЭДС обмотки якоря и пульсации ЭДС. Электромагнитный момент машины постоянного тока. Реакция якоря и её влияние на работу машины постоянного тока.**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Мощность и потери. Характер подводимой к машине мощности зависит от ее режима работы: у генераторов это механическая мощность  $P_1 = k_1 M \omega$ , у двигателей – электрическая мощность  $P_1 = UI$ . Характер снимаемой с машины полезной мощности – противоположный: у генератора это электрическая мощность  $P_2 = UI$ , у двигателя – механическая  $P_2 = k_2 M \omega$ . В машине всегда есть мощность потерь  $\Delta P$ , которая складывается из мощности электрических потерь (потери в меди)  $\Delta P_{эл} = RI^2$ , идущих на нагрев обмоток, мощности магнитных потерь (потери в стали)  $\Delta P_{маг}$ , мощности механических потерь (потери на трение)  $\Delta P_{мех}$  и мощности добавочных потерь  $\Delta P_{доб} \approx 0,01 P_{ном}$ , где  $P_{ном}$  – номинальная мощность. Таким образом,  $\Delta P = \Delta P_{мех} + \Delta P_{маг} + \Delta P_{эл} + \Delta P_{доб}$  и  $P_1 = P_2 + \Delta P$ .

КПД машины. КПД машины можно рассчитать по формуле  $\eta = P_2 / P_1$ . При экспериментальном определении КПД проще и, главное, точнее измерять не механическую мощность, а электрическую, и рассчитывать потери. Поэтому для определения КПД генератора пользуются формулой

$$\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P)$$

и КПД двигателя

$$\eta = (P_1 - \Delta P) / P_1.$$

КПД машин постоянного тока растет с увеличением мощности машин. Так, у микромашин мощностью до 0,1 кВт он составляет всего 30 – 40 %, у машин мощностью 10 кВт – 83 % и у машин 1000 кВт – 96 %.

КПД меняется также в зависимости от нагрузки (рис. 1.15). Из графика следует, что при малых нагрузках КПД резко падает, поэтому недогруженную машину невыгодно эксплуатировать.

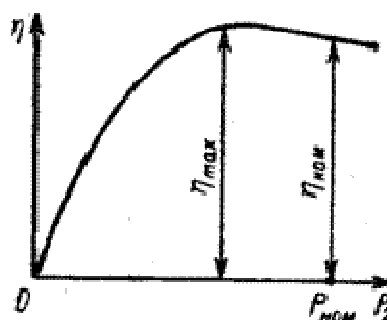


Рис. 1.15

### 3.3 Генераторы постоянного тока. Генератор с независимым возбуждением. Генераторы с параллельным и смешанным возбуждением.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Генератор постоянного тока — электрическая машина, преобразующая механическую энергию в электрическую энергию постоянного тока.



Генератор постоянного тока General Electric в Джорджтаунском музее электрических станций.

Принцип действия генераторов тока.

Принцип действия генератора основан на законе электромагнитной индукции — индуцировании электродвижущей силы в прямоугольном контуре (проводочной рамке), находящейся в однородном вращающемся магнитном поле.

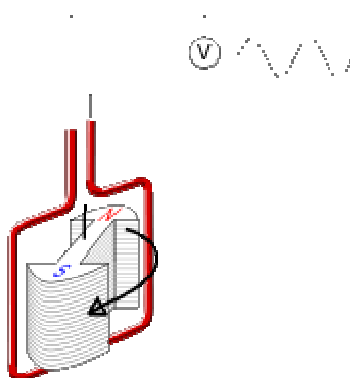


Рис. 1 В прямоугольном контуре вращается постоянный магнит.

Допустим, что однородное магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом вращается вокруг своей оси в проводящем контуре (проводочной рамке) с равномерной угловой скоростью  $\omega$ . Две равные порознь вертикальные стороны контура (см. рисунок) являются активными, так как их пересекают магнитные линии магнитного поля. Две равные порознь горизонтальные стороны контура — не активные,

так как магнитные линии магнитного поля их не пересекают, магнитные линии скользят вдоль горизонтальных сторон, электродвижущая сила в них не образуется.

В каждой из активных сторон контура индуцируется электродвижущая сила, величина которой определяется по формуле:

$$e_1 = Blv \sin \omega t \text{ и } e_2 = Blv \sin(\omega t + \pi) = -Blv \sin \omega t, \text{ где}$$

$e_1$  и  $e_2$  — мгновенные значения электродвижущих сил, индуцированных в активных сторонах контура, в вольтах;

$B$  — магнитная индукция магнитного поля в вольт-секундах на квадратный метр (Тл, Тесла);

$l$  — длина каждой из активных сторон контура в метрах;

$v$  — линейная скорость, с которой вращаются активные стороны контура, в метрах в секунду;

$t$  — время в секундах;

$\omega t$  и  $\omega t + \pi$  — углы, под которыми магнитные линии пересекают активные стороны контура.

Так как электродвижущие силы, индуцированные в активных сторонах контура, действуют согласно друг с другом, то результирующая электродвижущая сила, индуцируемая в контуре,

будет равна  $e = 2Blv \sin \omega t$ , то есть индуцированная электродвижущая сила в контуре изменяется по синусоидальному закону.

Если в контуре вращается однородное магнитное поле с равномерной угловой скоростью, то в нём индуцируется синусоидальная электродвижущая сила.

Особенности и устройство генераторов постоянного тока[править | править вики-текст]

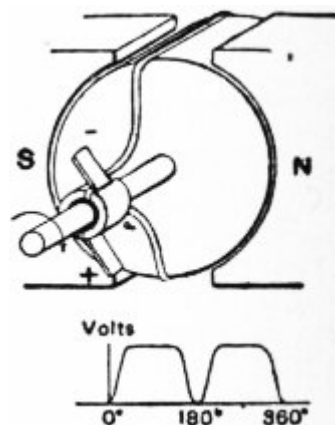


Рис. 2 Рамка с током вращается в магнитном поле, токосъём происходит щётками с полуколец.

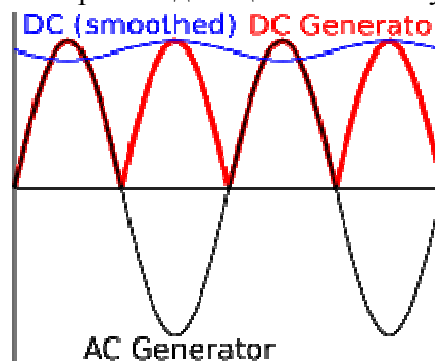


Рис. 3 Переменный синусоидальный ток Пульсирующий ток, снимаемый с двух полуколец Выпрямленный и сглаженный ток, снимаемый с якоря с большим количеством контуров и коллекторных пластин

В генераторах постоянного тока неподвижны магниты, создающие магнитное поле и называемые катушками возбуждения, а вращаются катушки, в которых индуцируется электродвижущая сила и с которых производится съём тока. Другая, главная особенность, состоит в способе съёма тока с катушек, который основан на том, что если концы активных сторон контура присоединить не к контактным кольцам (как это делается в генераторах переменного тока), а к полукольцам с изолированными промежутками между ними (как показано на рисунке 2) то тогда рамка с током будет давать во внешнюю цепь выпрямленное электрическое напряжение.

При вращении контура вместе с ним вращаются и полукольца вокруг их общей оси. Токосъём с полуколец осуществляется щётками. Так как щётки неподвижны, то они попеременно соприкасаются то с одним, то с другим полукольцом. Обмен полукольцами происходит в тот момент, когда синусоидальная электродвижущая сила в контуре переходит через своё нулевое значение. В результате каждая щётка сохраняет свою полярность неизменной. Если на полукольцах имеется некоторое синусоидальное напряжение, то на щётках оно уже становится выпрямленным (в данном случае пульсирующим). На практике в генераторах постоянного тока применяют не один проволочный контур, а значительно их большее количество, вывод от каждого конца каждого контура присоединяется к собственной контактной пластине, отделённой от соседних пластин изолирующими промежутками. Совокупность контактных пластин и изолирующих промежутков называется коллѐктор, контактная пластина носит название коллѐкторная пластина. Весь узел в сборе (коллектор, щётки и держатели щѐток) называется щѐточно-коллѐкторный узел. Материал, из которого изготавливают изолятор между коллекторными пластинами подбирается таким образом, чтобы его твёрдость приблизительно равнялась твёрдости коллекторных пластин (для равномерного износа). Применяется, как правило, миканит (прессованная слюда). Коллекторные пластины, как правило, изготавливают из меди.

Ярмо (статор) шестиполусного генератора постоянного тока. Видны полюсные наконечники особой формы.



Якорь генератора постоянного тока, цилиндр среднего диаметра —коллектор.

Остов (статор) генератора называется ярмо. К ярму прикреплены сердечники электромагнитов, крышки с подшипниками, в которых вращается вал генератора. Ярмо изготавливается из ферромагнитного материала (литая сталь). На сердечники электромагнитов насажены катушки возбуждения. Чтобы придать магнитным линиям магнитного поля необходимое направление, сердечники электромагнитов снабжаются полюсными наконечниками. Электромагниты, питаемые постоянным током (током возбуждения) создают в генераторе магнитное поле. Катушка возбуждения состоит из витков медной изолированной проволоки, намотанной на каркас. Обмотки катушек возбуждения соединены друг с другом последовательно таким образом, что любые два соседних сердечника имеют разноимѐнную магнитную полярность.

Вращающаяся часть генератора (ротор) называется якорь. Сердечник якоря изготавливается из электротехнической стали. Во избежание потерь на вихревые токи сердечник якоря собирается из отдельных стальных листов зубчатой формы, которые образуют впадины (пазы). Во впадины укладывается якорная (силовая) обмотка. В маломощных генераторах якорная обмотка изготавливается из медной изолированной проволоки, в мощных — из медных полос прямоугольной формы. Чтобы под действием центробежных сил якорная обмотка не была вырвана из пазов её закрепляют на сердечнике бандажами. Обмотка якоря наносится на сердечник так, что каждые два

активных проводника, соединённых непосредственно и последовательно друг с другом, лежат под разными магнитными полюсами. Обмотка называется волновой, если провод проходит поочередно под всеми полюсами и возвращается к исходному полюсу, и петлевой, если провод, пройдя под «северным» полюсом, а затем под соседним «южным» полюсом, возвращается на прежний «северный» полюс.

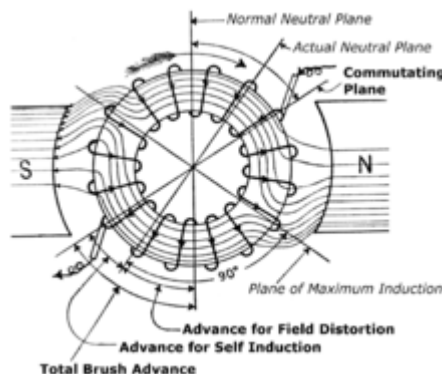
Чтобы пластины коллектора и изолирующие миканитовые (слюдяные) пластины между ними не были вырваны центробежными силами из своих гнезд — в нижней части они имеют крепление «ласточкин хвост».

Щётки, как правило, изготавливают из графита. Минимальное число щёток в генераторе постоянного тока равно двум: одна является положительным полюсом генератора (положительная щётка), другая — отрицательным полюсом (отрицательная щётка). В многополюсных генераторах число пар щёток обычно равняется числу пар полюсов, что обеспечивает лучшую работу генератора. Щётки одинаковой полярности (одноимённые щётки) электрически соединены друг с другом.

Щётка одновременно перекрывает две или три коллекторные пластины, это уменьшает искрение на коллекторе под щётками (улучшается коммутация).

Щёткодержатель обеспечивает постоянный прижим щёток вогнутой стороной к цилиндрической поверхности коллектора.

Реакция якоря.



Результирующее магнитное поле.

Если генератор постоянного тока не нагружен (холостой ход генератора), то магнитное поле статора (обмоток возбуждения) симметрично относительно оси полюсов S — N и геометрической нейтральной (на рисунке обозначено Normal neutral plane). Когда генератор нагружен, то через его якорную обмотку протекает электрический ток и создаёт своё собственное магнитное поле. Магнитные поля статора и ротора накладываются друг на друга и образуют результирующее магнитное поле.

Там, где якорь при своём вращении набегает на полюс электромагнита (магнита) статора, там результирующее поле слабее, там, где сбегает — сильнее. Это объясняется тем, что в первом случае магнитные поля имеют различные направления, а во втором — одинаковые. Если отсутствует магнитное насыщение стали в магнитопроводах — тогда считается, что результирующий магнитный поток не изменился по величине.

Однако по конфигурации результирующий магнитный поток значительно изменился, чем больше нагружен генератор и чем больше магнитное насыщение стали в магнитопроводах — тем сильнее проявляется реакция якоря и происходит некоторое уменьшение магнитного потока.

В результате электродвижущая сила генератора уменьшается и наблюдается искрение под щётками на коллекторе.

На практике с реакцией якоря борются:

применяя дополнительные магнитные полюса, компенсирующие магнитное поле якоря;

сдвигая щётки с геометрической нейтрали (Normal neutral plane) за физическую нейтраль (Actual neutral plane), устанавливая их и разворачивая на некоторый угол (на рисунке обозначено Commutating plane), что предупреждает искрение под щётками.

Применение генераторов постоянного тока.

Двигатель автомобиля ГАЗ-69, автомобильный генератор постоянного тока обозначен цифрой 9.

На заре электрификации (до конца XIX века) генераторы постоянного тока были единственным источником электрической энергии в промышленности (электрическая энергия, получаемая с помощью химических источников тока стоила дорого, да и в наше время батарейки имеют довольно высокую стоимость). Переменным током человечество просто не умело пользоваться.

Благодаря Вестингаузу, Яблочкову, Тесла, Доливо-Добровольскому были изобретены трансформаторы, асинхронные двигатели переменного тока, трёхфазная система электроснабжения. Постоянный ток стал уступать свои позиции.

Генераторы постоянного тока нашли применение на городском электротранспорте (трамваи и троллейбусы), в технике электросвязи.

До второй половины XX века генераторы постоянного тока применялись на автотранспорте (автомобильные генераторы), однако в связи с широким распространением полупроводниковых диодов их вытеснили более компактные и более надёжные трёхфазные генераторы переменного тока с встроенными выпрямителями.

Например, генератор постоянного тока Г-12 (автомобиль ГАЗ-69) весит 11 кг, номинальный ток 20 ампер, а генератор переменного тока Г-250П2 (автомобиль УАЗ-469) при массе 5,2 кг выдаёт номинальный ток 28 ампер; генератор 31400-83E00 (Suzuki Wagon R+) при весе 4,5 кг выдаёт ток 70 ампер. То есть, достигнуто практически 8-кратное увеличение токоотдачи на килограмм массы.

На железнодорожном транспорте (на тепловозах) до 1970-х гг. основным типом тягового генератора был генератор постоянного тока (тепловозы ТЭЗ, ТЭ10, ТЭП60, ТЭМ2 и др.), однако начался процесс их вытеснения трёхфазными генераторами, на тепловозах, таких как ТЭ109, ТЭ114, ТЭ129, ТЭМ7, ТЭМ9, ТЭРА1, ТЭП150, 2ТЭ25К применяется электрическая передача переменного-постоянного тока, устанавливаются синхронные трёхфазные тяговые генераторы. Тяговые электродвигатели постоянного тока, вырабатываемая генератором электроэнергия выпрямляется полупроводниковой выпрямительной установкой. Замена генератора постоянного тока на генератор переменного тока позволила снизить массу электрооборудования, резерв может быть использован для установки более мощного дизельного двигателя. Однако тяговый генератор переменного тока не может использоваться как стартер для тепловозного дизельного двигателя, запуск производится генератором постоянного тока для цепей управления. На новых российских локомотивах 2ТЭ25А, ТЭМ21 применяется электрическая передача переменного-переменного тока, с асинхронными тяговыми электродвигателями.

Параллельная работа генераторов постоянного тока.

Каждый генератор электрической энергии работает с наибольшим коэффициентом полезного действия при полной своей нагрузке, если генератор нагружен слабо, то режим его работы мало экономичен. Для экономичной работы генераторов в сети с сильно изменяющейся нагрузкой её обычно питают от нескольких генераторов, соединённых параллельно.

При параллельном соединении положительные зажимы генераторов через амперметр и рубильник подключаются к положительной распределительной шине, а

отрицательные зажимы — к отрицательной шине. Вольтметр позволяет измерять напряжение на зажимах генератора и проверять его полярность.

Если возрастает нагрузка на электросеть, запускают второй генератор. Регулируя обороты первичного двигателя, добиваются нормального числа оборотов и нормального напряжения на зажимах. После того, как электрическое напряжение второго генератора станет равно напряжению в сети, замыкают рубильник и подключают генератор к шинам. Однако в этом случае ЭДС второго генератора равна напряжению первого генератора и он не посылает ток в сеть. Чтобы загрузить второй генератор, необходимо несколько увеличить его ЭДС, регулируя ток возбуждения реостатом. Затем можно регулируя ток возбуждения первого генератора, перераспределять нагрузку между ними, при этом нужно следить, чтобы напряжение на распределительной шине оставалось неизменным.

Если ЭДС генератора окажется ниже электрического напряжения в распределительной шине, то он заработает как электродвигатель постоянного тока, что может привести к аварии.

Генераторы со смешанным возбуждением имеют уравнильный провод между одноимёнными (положительными или отрицательными) щётками генераторов, к которым подсоединён один из концов последовательной обмотки возбуждения. Уравнильный провод (шина) необходим для устойчивой параллельной работы генераторов. Если у одного генератора по какой-то причине уменьшится ЭДС, второй генератор по уравнильному проводу пошлёт ток в последовательную обмотку первого генератора, увеличит её магнитное поле и увеличит ЭДС первого генератора до необходимой величины. Таким образом достигается автоматическая регулировка электродвижущих сил параллельно работающих генераторов со смешанным возбуждением, достигается стабильность их работы.

### **3.4 Общие сведения. Пуск двигателя в ход. Основные характеристики двигателей постоянного тока. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

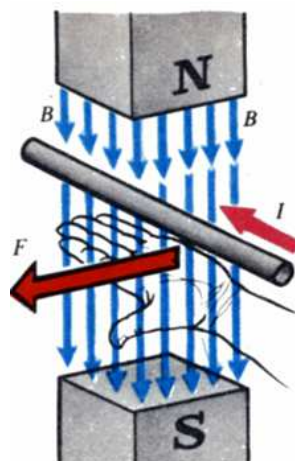
Электродвигатели постоянного тока применяют в тех электроприводах, где требуется большой диапазон регулирования скорости, большая точность поддержания скорости вращения привода, регулирования скорости вверх от номинальной.

Как устроены электродвигатели постоянного тока

Работа электрического двигателя постоянного тока основана на явлении электромагнитной индукции. Из основ электротехники известно, что на проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует сила, определяемая по правилу левой руки:

$$F = BIL,$$

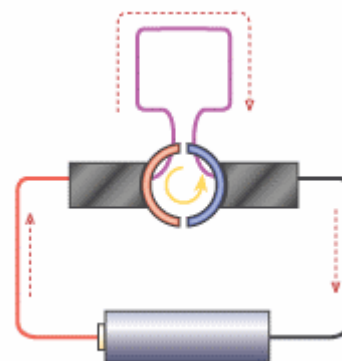
где  $I$  — ток, протекающий по проводнику,  $B$  — индукция магнитного поля;  $L$  — длина проводника.



При пересечении проводником магнитных силовых линий машины в нем наводится электродвижущая сила, которая по отношению к току в проводнике направлена против него, поэтому она называется обратной или противодействующей (противо-э. д. с.). Электрическая мощность в двигателе преобразуется в механическую и частично тратится на нагревание проводника.

Конструктивно все электрические двигатели постоянного тока состоят из индуктора и якоря, разделенных воздушным зазором.

Индуктор электродвигателя постоянного тока служит для создания неподвижного магнитного поля машины и состоит из станины, главных и добавочных полюсов. Станина служит для крепления основных и добавочных полюсов и является элементом магнитной цепи машины. На главных полюсах расположены обмотки возбуждения, предназначенные для создания магнитного поля машины, на добавочных полюсах - специальная обмотка, служащая для улучшения условий коммутации.



Якорь электродвигателя постоянного тока состоит из магнитной системы, собранной из отдельных листов, рабочей обмотки, уложенной в пазы, и коллектора служащего для подвода к рабочей обмотке постоянного тока.

Коллектор представляет собой цилиндр, насаженный на вал двигателя и избранный из изолированных друг от друга медных пластин. На коллекторе имеются выступы-петушки, к которым припаяны концы секций обмотки якоря. Съем тока с коллектора осуществляется с помощью щеток, обеспечивающих скользящий контакт с коллектором. Щетки закреплены в щеткодержателях, которые удерживают их в определенном положении и обеспечивают необходимое нажатие щетки на поверхность коллектора. Щетки и щеткодержатели закреплены на траверсе, связанной с корпусом электродвигателя.

Коммутация в электродвигателях постоянного тока

В процессе работы электродвигателя постоянного тока щетки, скользя по поверхности вращающегося коллектора, последовательно переходят с одной коллекторной пластины на другую. При этом происходит переключение параллельных секций обмотки якоря и изменение тока в них. Изменение тока происходит в то время, когда виток обмотки замкнут щеткой накоротко. Этот процесс переключения и явления, связанные с ним, называются коммутацией.

В момент коммутации в короткозамкнутой секции обмотки под влиянием собственного магнитного поля наводится э. д. с. самоиндукции. Результирующая э. д. с. вызывает в короткозамкнутой секции дополнительный ток, который создает неравномерное распределение плотности тока на контактной поверхности щеток. Это

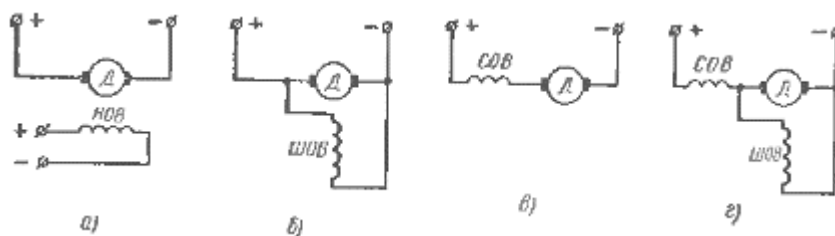


обстоятельство считается основной причиной искрения коллектора под щеткой. Качество коммутации оценивается по степени искрения под сбегающим краем щетки и определяется по шкале степеней искрения.



#### Способы возбуждения электродвигателей постоянного тока

Под возбуждением электрических машин понимают создание в них магнитного поля, необходимого для работы электродвигателя. Схемы возбуждения электродвигателей постоянного тока показаны на рисунке.



Схемы возбуждения электродвигателей постоянного тока: а - независимое, б - параллельное, в - последовательное, г - смешанное

По способу возбуждения электрические двигатели постоянного тока делят на четыре группы:

1. С независимым возбуждением, у которых обмотка возбуждения НОВ питается от постороннего источника постоянного тока.
2. С параллельным возбуждением (шунтовые), у которых обмотка возбуждения ШОВ включается параллельно источнику питания обмотки якоря.
3. С последовательным возбуждением (серийные), у которых обмотка возбуждения СОВ включена последовательно с якорной обмоткой.
4. Двигатели со смешанным возбуждением (компаундные), у которых имеется последовательная СОВ и параллельная ШОВ обмотки возбуждения.

#### Пуск двигателей постоянного тока

В начальный момент пуска двигателя якорь неподвижен и против-э. д. с. и напряжение в якоре равно нулю, поэтому  $I_p = U / R_{\text{я}}$ .

Сопротивление цепи якоря невелико, поэтому пусковой ток превышает в 10 - 20 раз и более номинальный. Это может вызвать значительные электродинамические усилия в обмотке якоря и чрезмерный ее перегрев, поэтому пуск двигателя производят с помощью пусковых реостатов - активных сопротивлений, включаемых в цепь якоря.

Двигатели мощностью до 1 кВт допускают прямой пуск.

Величина сопротивления пускового реостата выбирается по допустимому пусковому току двигателя. Реостат выполняют ступенчатым для улучшения плавности пуска электродвигателя.

В начале пуска вводится все сопротивление реостата. По мере увеличения скорости якоря возникает против-э. д. с, которая ограничивает пусковые токи. Постепенно выводя ступень за ступенью сопротивление реостата из цепи якоря, увеличивают подводимое к якорю напряжение.

#### Регулирование частоты вращения электродвигателя постоянного тока

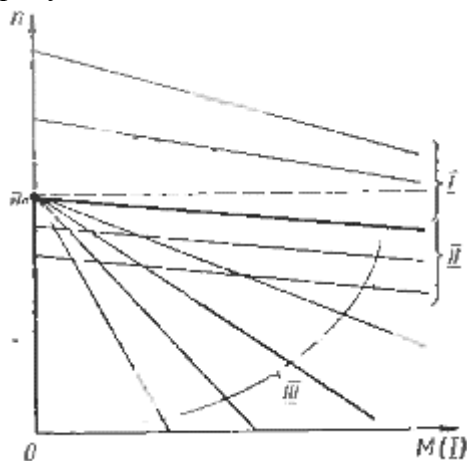
Частота вращения двигателя постоянного тока:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{k_c \Phi},$$

где  $U$  — напряжение питающей сети;  $I_a$  — ток якоря;  $R_a$  — сопротивление цепи якоря;  $k_c$  — коэффициент, характеризующий магнитную систему;  $\Phi$  — магнитный поток электродвигателя.

Из формулы видно, что частоту вращения электродвигателя постоянного тока можно регулировать тремя путями: изменением потока возбуждения электродвигателя, изменением подводимого к электродвигателю напряжения и изменением сопротивления в цепи якоря.

Наиболее широкое применение получили первые два способа регулирования, третий способ применяют редко: он неэкономичен, скорость двигателя при этом значительно зависит от колебаний нагрузки. Механические характеристики, которые при этом получаются, показаны на рисунке.



Механические характеристики электродвигателя постоянного тока при различных способах регулирования частоты вращения

Жирная прямая — это естественная зависимость скорости от момента на валу, или, что то же, от тока якоря. Прямая естественной механической характеристики несколько отклоняется от горизонтальной штриховой линии. Это отклонение называют нестабильностью, нежесткостью, иногда статизмом. Группа непараллельных прямых I соответствует регулированию скорости возбуждением, параллельные прямые II получаются в результате изменения напряжения якоря, наконец, веер III — это результат введения в цепь якоря активного сопротивления.

Величину тока возбуждения двигателя постоянного тока можно регулировать с помощью реостата или любого устройства, активное сопротивление которого можно изменять по величине, например транзистора. При увеличении сопротивления в цепи ток возбуждения уменьшается, частота вращения двигателя увеличивается. При ослаблении магнитного потока механические характеристики располагаются выше естественной (т. е. выше характеристики при отсутствии реостата). Повышение частоты вращения двигателя вызывает усиление искрения под щетками. Кроме того, при работе электродвигателя с ослабленным потоком уменьшается устойчивость его работы, особенно при переменных нагрузках на валу. Поэтому пределы регулирования скорости таким способом не превышают 1,25 - 1,3 от номинальной.

Регулирование изменением напряжения требует источника постоянного тока, например генератора или преобразователя. Такое регулирование используют во всех промышленных системах электропривода: генератор - двигатель постоянного тока (Г - ДПТ), электромашинный усилитель - двигатель постоянного тока (ЭМУ - ДПТ), магнитный усилитель - двигатель постоянного тока (МУ - ДПТ), тиристорный преобразователь - двигатель постоянного тока (Т - ДПТ).

### Торможение электродвигателей постоянного тока

В электроприводах с электродвигателями постоянного тока применяют три способа торможения: динамическое, рекуперативное и торможение противовключением.

Динамическое торможение электродвигателя постоянного тока осуществляется путем замыкания обмотки якоря двигателя накоротко или через резистор. При этом электродвигатель постоянного тока начинает работать как генератор, преобразуя запасенную им механическую энергию в электрическую. Эта энергия выделяется в виде тепла в сопротивлении, на которое замкнута обмотка якоря. Динамическое торможение обеспечивает точный останов электродвигателя.

Рекуперативное торможение электродвигателя постоянного тока осуществляется в том случае, когда включенный в сеть электродвигатель вращается исполнительным механизмом со скоростью, превышающей скорость идеального холостого хода. Тогда э. д. с, наведенная в обмотке двигателя, превысит значение напряжения сети, ток в обмотке двигателя изменит направление на противоположное. Электродвигатель переходит на работу в генераторном режиме, отдавая энергию в сеть. Одновременно на его валу возникает тормозной момент. Такой режим может быть получен в приводах подъемных механизмов при опускании груза, а также при регулировании скорости двигателя и во время тормозных процессов в электроприводах постоянного тока.



Рекуперативное торможение двигателя постоянного тока является наиболее экономичным способом, так как в этом случае происходит возврат в сеть электроэнергии. В электроприводе металлорежущих станков этот способ применяют при регулировании скорости в системах Г - ДПТ и ЭМУ - ДПТ.

Торможение противовключением электродвигателя постоянного тока осуществляется путем изменения полярности напряжения и тока в обмотке якоря. При взаимодействии тока якоря с магнитным полем обмотки возбуждения создается тормозной момент, который уменьшается по мере уменьшения частоты вращения электродвигателя. При уменьшении частоты вращения электродвигателя до нуля электродвигатель должен быть отключен от сети, иначе он начнет разворачиваться в обратную сторону.

### **3.5 Назначение, классификация и область применения. Принцип действия трансформатора. Устройство и конструктивное исполнение отдельных элементов трансформатора.**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока.

С помощью трансформаторов повышается или понижается напряжение, изменяется число фаз, а в некоторых случаях преобразуется частота переменного тока. Возможность передачи электрических сигналов от одной обмотки к другой посредством взаимной индукции была открыта М. Фарадеем в 1831 г.; при изменении тока в одной из обмоток, намотанной на стальной магнитопровод, в другой обмотке индуцировалась ЭДС. Однако первый практически работающий трансформатор создал известный изобретатель П. Н. Яблочков в содружестве с И. Ф. Усагиным в 1876 г. Это был двухобмоточный трансформатор с разомкнутым магнитопроводом.

В дальнейшем несколько конструкций однофазных трансформаторов с замкнутым магнитопроводом были созданы венгерскими электротехниками О. Блати, М. Дери и К. Циперноеским. Для развития трансформаторостроения и вообще электромашиностроения

большое значение имели работы проф. А. Г. Столетова по исследованию магнитных свойств стали и расчету магнитных цепей.

Важная роль в развитии электротехники принадлежит М. О. Доливо-Добровольскому. Он разработал основы теории многофазных и, в частности, трехфазных переменных токов и создал первые трехфазные электрические машины и трансформаторы. Трехфазный трансформатор современной формы с параллельными стержнями, расположенными в одной плоскости, был изобретен им в 1891 г. С тех пор происходило дальнейшее конструктивное усовершенствование трансформаторов, уменьшалась их масса и габариты, повышалась экономичность. Основные положения теории трансформаторов были разработаны в трудах Е. Арнольда и М. Видмара.

В развитии теории трансформаторов и совершенствовании их конструкции большое значение имели работы советских ученых В. В. Корицкого, Л. М. Пиотровского, Г. Н. Петрова, А. В. Сапожникова, А. В. Трамбицкого и др.

Трансформаторы широко используют для следующих целей.

Для передачи и распределения электрической энергии. Обычно на электростанциях генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6—24 кВ. Передавать же электроэнергию на дальние расстояния выгодно при больших напряжениях, поэтому на каждой электростанции устанавливают трансформаторы, повышающие напряжение.

В настоящее время для высоковольтных линий электропередачи в СССР применяют силовые трансформаторы с масляным охлаждением напряжением 330, 500 и 750 кВ, мощностью до 1200—1600 МВ-А. В связи со строительством дальних линий электропередачи Экибастуз — Центр, Экибастуз — Урал и других напряжением 1150 кВ переменного тока наша электропромышленность создала трансформаторные группы, состоящие из трех однофазных трансформаторов мощностью 667 МВ-А, а для линий 1500 В постоянного тока — двенадцати фазные преобразовательные блоки с четырехобмоточными трансформаторами общей мощностью 1500 МВ-А. КПД таких трансформаторов составляет 98 — 99% и выше.

Для перспективных линий электропередачи переменного тока напряжением 1800—2000 кВ и постоянного тока напряжением 3000 кВ разрабатывают трансформаторы мощностью 1320 МВ-А на одну фазу.

Электрическая энергия распределяется между промышленными предприятиями и населенными пунктами, в городах и сельских местностях, а также внутри промышленных предприятий по воздушным и кабельным линиям при напряжении 220, 110, 35, 20, 10 и 6 кВ. Следовательно, во всех узлах распределительных сетей должны быть установлены трансформаторы, понижающие напряжение. Кроме того, понижающие трансформаторы следует устанавливать в пунктах потребления электроэнергии, так как большинство электрических потребителей переменного тока работает при напряжениях 220, 380 и 660 В. Таким образом, электрическая энергия при передаче от электрических станций к потребителям подвергается в трансформаторах многократному преобразованию (3 — 5 раз). Применяемые для этих целей трансформаторы могут быть одно- и трехфазными, двух- и трехобмоточными.

Для обеспечения нужной схемы включения вентиля в преобразовательных устройствах и согласования напряжений на входе и выходе преобразователя. В вентильных преобразователях, выпрямляющих переменный ток или преобразующих его из постоянного в переменный (инверторы), отношение напряжений на входе и выходе зависит от схемы включения вентиля. Поэтому если на вход преобразователя подается стандартное напряжение, то на выходе получается нестандартное. Для устранения этого недостатка вентильные преобразователи, как правило, снабжают трансформаторами, обеспечивающими стандартное выходное напряжение при принятой схеме включения вентиля. Кроме того, ряд схем включения вентиля требует обязательного применения трансформатора. Трансформаторы, применяемые для этой цели,

называют преобразовательными. Их мощность достигает тысяч киловольт-ампер, напряжение 110 кВ; они работают при частоте 50 Гц и более. Рассматриваемые трансформаторы выполняют одно-, трех- и многофазными с регулированием выходного напряжения в широких пределах и без регулирования.

В последнее время для возбуждения мощных турбо-и гидрогенераторов, электропривода и других целей все шире начинают применять трансформаторы с естественным воздушным охлаждением напряжением 3 — 24 кВ и мощностью 133-6300 кВ·А. Благодаря использованию в этих трансформаторах новой теплостойкой изоляции удается повысить их нагрузочную способность и в 1,3 — 1,5 раз сократить, массогабаритные показатели по сравнению с применявшимися ранее трансформаторами с масляным охлаждением.

Для различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питания электротермических установок (электропечные трансформаторы) и др. Мощность их достигает десятков тысяч киловольт-ампер при напряжении до 10 кВ; они работают обычно при частоте 50 Гц.

Для питания различных цепей радио- и телевизионной аппаратуры; устройств связи, автоматики в телемеханике, электробытовых приборов; для разделения электрических цепей различных элементов этих устройств; для согласования напряжений и т. п. Трансформаторы, используемые в этих устройствах, обычно имеют малую мощность (от нескольких вольт-ампер до нескольких киловольтампер), невысокое напряжение, работают при частоте 50 Гц и более. Их выполняют двух-, трех- и многообмоточными; условия работы, предъявляемые к ним требования и принципы проектирования весьма специфичны.

Для включения электроизмерительных приборов и некоторых аппаратов, например реле, в электрические цепи высокого напряжения или в цепи, по которым проходят большие токи, с целью расширения пределов измерения и обеспечения электробезопасности. Трансформаторы, применяемые для этой цели, называют измерительными. Они имеют сравнительно небольшую мощность, определяемую мощностью, потребляемой электроизмерительными приборами, реле и др.

Трансформаторы, перечисленные в п. 1, 2, 3 и частично в п. 4, предназначенные для преобразования электрической энергии в сетях энергосистем и потребителей электрической энергии, называют силовыми. Для режима их работы характерны неизменная частота переменного тока и очень малые отклонения первичного и вторичного напряжений от номинальных значений.

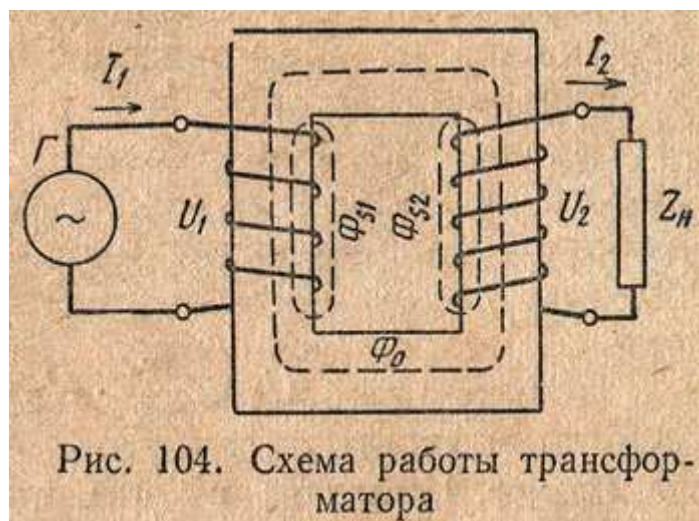
Силовые трансформаторы, выпускаемые отечественными заводами, разделены на несколько групп (габаритов) от I до VIII. Например, трансформаторы мощностью до 100 кВ·А включительно относят к габариту I, от 160 до 630 кВ · А — к габариту II, от 1000 до 6300 кВ · А — к габариту III и т. п.

В данной главе в основном рассматривается теория силовых трансформаторов; другие же виды трансформаторов рассмотрены кратко на основе общей теории.

### **3.6 Режим холостого хода. Режим работы трансформатора под нагрузкой. Схемы замещения трансформатора.**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

При работе трансформатора под нагрузкой (рис. 104) в первичной и во вторичной его обмотке протекают токи, создающие потоки рассеяния  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$ . Потоки рассеяния сцеплены только с витками той обмотки, током которой они создаются, и всегда меньше основного магнитного потока  $\Phi_0$ , замыкающегося по магнитопроводу трансформатора (по стали), так как потоки рассеяния проходят через немагнитную среду.



Основной магнитный поток  $\Phi_0$ , пронизывая витки первичной и вторичной обмоток, индуцирует в них э. д. с., зависящие от числа витков обмотки, амплитуды магнитного потока и частоты его изменения. Действующие значения э. д. с. обмоток:

$$E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44\omega_2 f \Phi_m,$$

где  $E_1$  и  $E_2$  — действующие значения э. д. с. первичной и вторичной обмоток;  
 $\omega_1$  и  $\omega_2$  — числа витков этих обмоток;  
 $f$  — частота тока;

$\Phi_m$  — амплитуда (наибольшее значение) магнитного потока в сердечнике, вб.

Так как потоки рассеяния и падения напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора очень малы, то приближенно можно считать, что напряжения на зажимах первичной  $U_1$  и вторичной  $U_2$  обмоток равны э. д. с. этих обмоток, т. е.  $U_1 = E_1$  и  $U_2 = E_2$ .

При холостом ходе трансформатора оба напряжения практически не отличаются по величине от соответствующих э. д. с. По этой причине отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора при холостом ходе (без нагрузки) называется коэффициентом трансформации и обозначается буквой  $K$ , т. е.

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44\omega_1 f \Phi_m}{4,44\omega_2 f \Phi_m} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (103)$$

Таким образом, если в трансформаторе первичная и вторичная обмотки имеют различное число витков, то при включении первичной обмотки в сеть переменного тока с напряжением  $U_1$  на зажимах вторичной обмотки возникает напряжение  $U_2$ , не равное напряжению  $U_1$ . Если число витков вторичной обмотки меньше числа витков первичной, то в той же мере напряжение на зажимах вторичной обмотки меньше напряжения первичной обмотки и трансформатор является понижающим. Если же число витков вторичной обмотки больше числа витков первичной, то и напряжение вторичной обмотки больше напряжения первичной и трансформатор окажется повышающим.

$$U_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot U_1 = \frac{1}{K} \cdot U_1. \quad (104)$$

Пример. Первичная обмотка трансформатора с числом витков  $\omega_1 = 660$  включена в сеть напряжением  $U_1 = 220$  в. Определить напряжение на зажимах вторичной обмотки, если число ее витков  $\omega_2 = 36$ .

Решение.

$$U_2 = \frac{\omega_2}{\omega_1} \cdot U_1 = \frac{36}{660} \cdot 220 = 12 \text{ в.}$$

Напряжение и э. д. с. вторичной обмотки трансформатора зависит от числа витков. Поэтому наиболее простым способом регулирования напряжения трансформатора является изменение числа витков одной из обмоток, чаще обмотки высшего напряжения.

Число витков изменяется обычно в пределах  $\pm 5\%$  от номинального. Для этой цели от



одного из концов обмотки делают отводы.

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на какой-либо приемник электрической энергии, то во вторичной цепи будет протекать ток  $I_2$ , а в первичной обмотке ток  $I_1$  который может быть представлен геометрической суммой тока холостого хода и нагрузочного тока.

Первичная и вторичная обмотки трансформатора электрически не соединены. Однако надо иметь в виду, что за счет магнитной связи между этими обмотками изменение тока во вторичной обмотке  $I_2$  будет вызывать соответствующее изменение тока первичной обмотки  $I_1$ . Если увеличится ток во вторичной обмотке, то увеличится ток и в первичной обмотке. Наоборот, при уменьшении тока во вторичной обмотке уменьшится ток и в первичной обмотке. Если разомкнуть вторичную обмотку, то ток в ней станет равным нулю, а в первичной обмотке уменьшится до малой величины.

Ток  $I_0$ , протекающий по первичной обмотке трансформатора, при разомкнутой вторичной цепи называется током холостого хода, который значительно меньше номинального тока трансформатора.

По первичной и вторичной обмоткам при нагрузке протекают численно неравные токи. Если пренебречь потерями мощности в трансформаторе, то можно записать, что мощность, отдаваемая трансформатором приемнику энергии  $U_2 I_2$ , равна мощности, потребляемой им из сети источника энергии  $U_1 I_1$  т. е.

$$U_2 I_2 = U_1 I_1,$$

откуда

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = K$$

и

$$I_2 = K I_1. \quad (105)$$

Пренебрегая падением напряжения в сопротивлениях первичной обмотки трансформатора, можно допустить, как это было показано выше, при любой его нагрузке приближенное равенство абсолютных величин приложенного напряжения  $U_1$  и уравнивающей это напряжение э. д. с. первичной обмотки, т. е.

$$U_1 = E_1. \quad (106)$$

На основании этого равенства можно сказать, что при неизменном по величине приложенном напряжении  $U_1$  будет приблизительно неизменной э. д. с.  $E_1$  индуцируемая в первичной обмотке трансформатора при любой его нагрузке.

А так как э. д. с.  $E_1$  зависит от магнитного потока  $\Phi_m$ , то и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора при любом изменении нагрузки будет приблизительно неизменным.

Таким образом, при неизменном приложенном напряжении магнитный поток в сердечнике трансформатора будет практически неизменным при любом изменении нагрузки.

Ток  $I_2$ , протекающий по вторичной обмотке при нагрузке трансформатора, создает свой магнитный поток, который, согласно закону Ленца, направлен встречно магнитному потоку в сердечнике, стремясь его уменьшить. Чтобы результирующий магнитный поток в сердечнике остался неизменным, встречный магнитный поток вторичной обмотки должен быть уравновешен магнитным потоком первичной обмотки.

Следовательно, при увеличении тока вторичной обмотки  $I_2$  возрастает размагничивающий магнитный поток этой обмотки и одновременно повышается как ток первичной обмотки  $I_1$  так и магнитный поток, создаваемый этим током. Так как магнитный поток первичной обмотки уравнивает размагничивающий поток вторичной обмотки, то результирующий магнитный поток в сердечнике поддерживается неизменным.

В понижающем трансформаторе напряжение первичной обмотки  $U_1$  больше напряжения вторичной обмотки  $U_2$  в  $K$  раз, следовательно, и сила тока вторичной

обмотки I2 больше силы тока первичной обмотки I1 также в K раз. В повышающем трансформаторе имеет место обратное соотношение между напряжениями его обмоток и между силами токов в них. Если, например, включить на полную нагрузку трансформатор, напряжения первичной и вторичной обмоток которого равны  $U_1 = 220$  в,  $U_2 = 24$  в, то при номинальной силе тока первичной обмотки  $= 0,3$  а сила тока во вторичной обмотке

$$I_2 = 0,3 \cdot \frac{220}{24} = 2,75 \text{ а.}$$

Если напряжения первичной и вторичной обмоток соответственно равны  $U_1 = 127$  в,  $U_2 = 510$  в, то при силе тока во вторичной обмотке  $I_2 = 0,2$  а в первичной обмотке сила тока будет примерно равна:

$$I_1 = I_2 \frac{U_2}{U_1} = 0,2 \cdot \frac{510}{127} = 0,8 \text{ а.}$$

Таким образом, обмотка с более высоким напряжением имеет большее число витков и выполнена из провода с меньшим поперечным сечением, чем обмотка с более низким напряжением, так как сила тока в обмотке более высокого напряжения меньше силы тока в обмотке с более низким напряжением.

### 3.7 Трёхфазные трансформаторы. Преобразование трёхфазного тока. Схемы и группы соединений трёхфазных трансформаторов.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Трёхфазный ток можно трансформировать тремя совершенно отдельными однофазными трансформаторами. В этом случае обмотки всех трех фаз магнитно не связаны друг с другом: каждая фаза имеет свою магнитную цепь. Но тот же трехфазный ток можно трансформировать и одним трехфазным трансформатором, у которого обмотки всех трех фаз магнитно связаны между собою, так как имеют общую магнитную цепь.

Чтобы уяснить себе принцип действия и устройства трехфазного трансформатора, представим себе три однофазных трансформатора, приставленных один к другому так, что три стержня их образуют один общий центральный стержень (рис. 1). На каждом из остальных трех стержней наложены первичные и вторичные обмотки (на рис. 1 вторичные обмотки не изображены).

Предположим, что первичные катушки всех стержней трансформатора совершенно одинаковы и намотаны в одном направлении (на рис. 1 первичные катушки намотаны по часовой стрелке, если смотреть на них сверху). Соединим все верхние концы катушек в нейтраль О, а нижние концы катушек подведем к трем зажимам трехфазной сети.

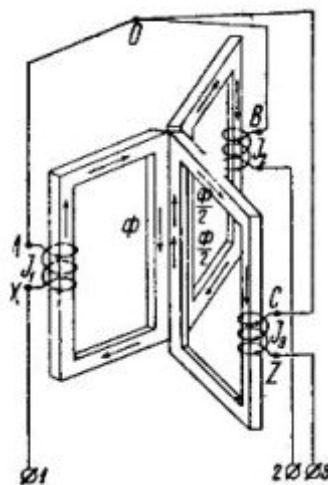


Рисунок 1.



Токи в катушках трансформатора создадут переменные во времени магнитные потоки, которые будут замыкаться каждый в своей магнитной цепи. В центральном составном стержне магнитные потоки сложатся и в сумме дадут ноль, ибо эти потоки создаются симметричными трехфазными токами, относительно которых мы знаем, что сумма мгновенных значений их равна нулю в любой момент времени.

Например, если бы в катушке AX ток  $I_1$  был наибольший и проходил в указанном на рис. 1 направлении, то магнитный поток был бы равен наибольшему своему значению  $\Phi$  и был направлен в центральном составном стержне сверху вниз. В двух других катушках BY и CZ токи  $I_2$  и  $I_3$  в тот же момент времени равны половине наибольшего тока и имеют обратное направление по отношению к току в катушке AX (таково свойство трехфазных токов). По этой причине в стержнях катушек BY и CZ магнитные по токи будут равны половине наибольшего потока и в центральном составном стержне будут иметь обратное направление по отношению к потоку катушки AX. Сумма потоков в рассматриваемый момент равна нулю. То же самое имеет место и для любого другого момента.

Отсутствие потока в центральном стержне не означает отсутствия потоков в остальных стержнях. Если бы мы уничтожили центральный стержень, а верхние и нижние ярма соединили в общие ярма (см. рис. 2), то поток катушки AX нашел бы себе путь через сердечники катушек BY и CZ, причем магнитодвижущие силы этих катушек сложились бы с магнитодвижущей силой катушки AX. В таком случае мы получили бы трехфазный трансформатор с общей магнитной цепью всех трех фаз.

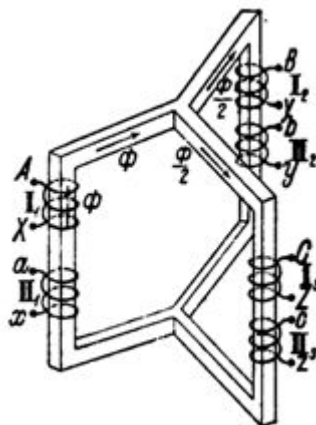


Рисунок 2.

Так как токи в катушках смещены по фазе на  $1/3$  периода, то и создаваемые ими магнитные потоки также смещены во времени на  $1/3$  периода, т. е. наибольшие значения магнитных потоков в стержнях катушек следуют друг за другом через  $1/3$  периода.

Следствием сдвига по фазе магнитных потоков в сердечниках на  $1/3$  периода является такой же сдвиг по фазе и электродвижущих сил, индуцируемых как в первичных, так и во вторичных катушках, наложенных на стержнях. Электродвижущие силы первичных катушек почти уравнивают приложенное трехфазное напряжение. Электродвижущие силы вторичных катушек при правильном соединении концов катушек дают трехфазное вторичное напряжение, которое подается во вторичную цепь.

В отношении конструкции магнитной цепи трехфазные трансформаторы, как и однофазные, разделяются на стержневые рис. 2. и броневые.



Стержневые трехфазные трансформаторы подразделяются на:

- а) трансформаторы с симметричной магнитной цепью и
- б) трансформаторы с несимметричной магнитной цепью.

На рис. 3 схематически изображен стержневой трансформатор с симметричной магнитной цепью, а на рис. 4 изображен стержневой трансформатор с несимметричной магнитной цепью. Как видно из рис. 3 из трех железных стержней 1, 2 и 3, схваченных сверху и снизу железными накладками-ярмами. На каждом стержне находятся первичная I и вторичная II катушки одной фазы трансформатора.

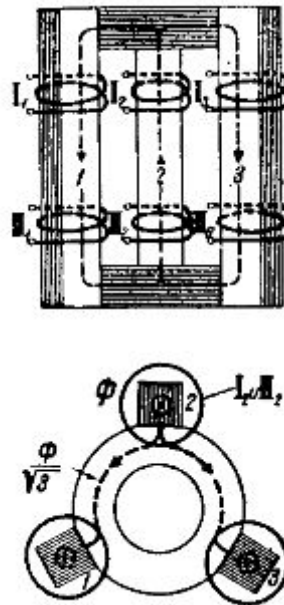


Рисунок 3.

У первого трансформатора стержни расположены по вершинам углов равностороннего треугольника; у второго трансформатора стержни расположены в одной плоскости.

Расположение стержней по вершинам углов равностороннего треугольника дает равные магнитные сопротивления для магнитных потоков всех трех фаз, так как пути прохождения этих потоков одинаковы. В самом деле, магнитные потоки трех фаз проходят каждый в отдельности через один вертикальный стержень полностью и через два других стержня по половине.

На рис. 3 пунктиром изображены пути замыкания магнитного потока фазы стержня 2. Легко видеть, что для потоков фаз стержней 1 и 3 пути замыкания их магнитных потоков совершенно одинаковы. Это значит, что у рассматриваемого трансформатора магнитные сопротивления для потоков равны между собою.

Расположение стержней в одной плоскости приводит к тому, что магнитное сопротивление для потока средней фазы (на рис. 4 для фазы стержня 2) меньше, нежели для потоков крайних фаз (на рис. 4 — для фаз стержней 1 и 3).

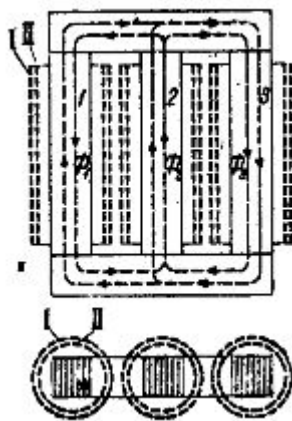


Рисунок 4.

Действительно магнитные потоки крайних фаз проходят по несколько более длинным путям, чем поток средней фазы. Кроме того, поток крайних фаз, выйдя из своих стержней, проходит в одной половине ярма полностью, и только в другой половине (после ответвления в средний стержень) проходит его половина. Поток же средней фазы по выходе из вертикального стержня тотчас же разветвляется на две половины, и потому в обеих частях ярма проходит лишь половина потока средней фазы.



Таким образом потоки крайних фаз насыщают ярмо в большей степени, чем поток средней фазы, а потому магнитное сопротивление для потоков крайних фаз больше, чем для потока средней фазы.

Следствием неравенства магнитных сопротивлений для потоков разных фаз трехфазного трансформатора является неравенство токов холостой работы в отдельных фазах при одном и том же фазном напряжении.

Однако при небольшой насыщенности железа ярма и хорошей сборке железа стержней это неравенство токов незначительно. Так как конструкция трансформаторов с несимметричной магнитной цепью значительно проще, чем трансформатора с симметричной магнитной цепью, то первые трансформаторы и нашли себе преимущественное применение. Трансформаторы с симметричной магнитной цепью встречаются редко.

Рассматривая рис. 3 и 4 и предполагая, что во всех трех фазах проходят токи, легко видеть, что все фазы магнитно связаны друг с другом. Это значит, что магнитодвижущие силы отдельных фаз влияют друг на друга, чего мы не имеем, когда трехфазный ток трансформируется тремя однофазными трансформаторами.

Вторую группу трехфазных трансформаторов составляют броневого трансформаторы. Броневого трансформатор можно рассматривать как бы состоящим из трех однофазных броневого трансформаторов, приставленных один к другому своими ярмами.

На рис. 5 схематически изображен броневой трехфазный трансформатор с вертикально расположенным внутренним стержнем. Легко видеть из рисунка, что плоскостями АВ и CD он может быть разбит на три однофазных броневых трансформатора, магнитные потоки которых могут замыкаться каждый по своей магнитной цепи. Пути прохождения магнитных потоков на рис. 5 указаны пунктирными линиями.

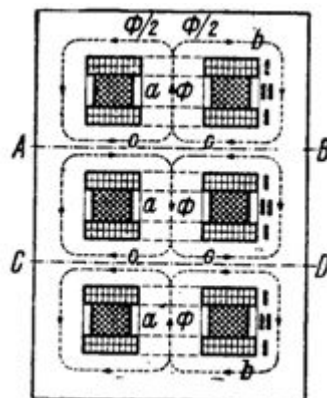


Рисунок 5.

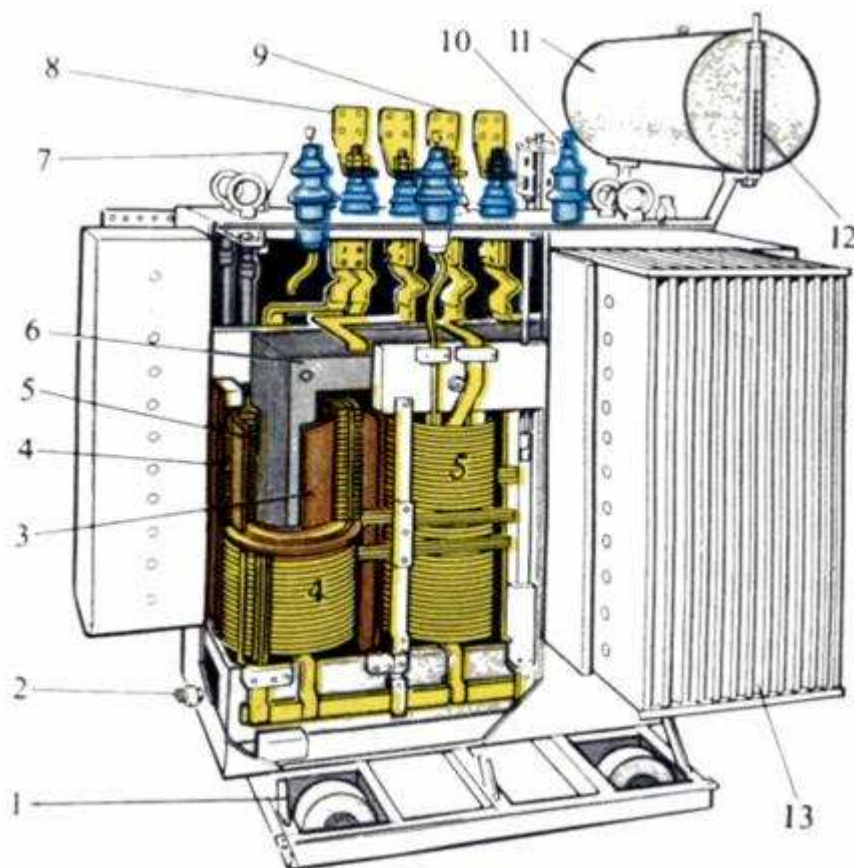
Как видно из рисунка, в средних вертикальных стержнях а, на которых наложены первичная I и вторичная II обмотки одной фазы, проходит полный поток, тогда как в ярмах b-b и боковых стенках проходит по половине потока. При одной и той же индукции сечения ярма и боковых стенок должны быть вдвое меньше сечения среднего стержня а.

Что касается магнитного потока в промежуточных частях с-с, то его величина, как мы увидим далее, зависит от способа включения средней фазы.

Главным преимуществом броневых трансформаторов перед стержневыми трансформаторами являются короткие пути замыкания магнитных потоков, а следовательно, небольшие токи холостой работы.

К недостаткам броневых трансформаторов можно отнести, во-первых, малую доступность обмоток для ремонта, в виду того, что они окружены железом, и, во-вторых, худшие условия охлаждения обмотки — по той же причине.

У стержневых трансформаторов обмотки почти целиком открыты и потому более доступны для осмотра и ремонта, а также и для охлаждающей среды.



Трехфазный масляный трансформатор с трубчатым баком: 1 - катки, 2 - спускной кран для масла, 3 - изолирующий цилиндр, 4 - обмотка высшего напряжения, 5 - обмотка низшего напряжения, 6 - сердечник, 7 - термометр, 8 - выводы низшего напряжения, 9 - выводы высшего напряжения, 10 - расширитель для масла, 11 - газовые реле, 12 - указатель уровня масла, 13 - радиаторы.

### 3.8 Регулирование вторичного напряжения трансформаторов. Параллельная работа трансформаторов.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Режим холостого хода. При разомкнутой вторичной обмотке трансформатор работает в режиме холостого хода. Ток холостого хода  $i_0$ , проходящий по первичной обмотке, имеет две составляющие: активную  $i_{0a}$  и реактивную  $i_{0p}$ . При этом

$$\dot{I} = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0p}$$

Реактивная составляющая называется намагничивающим током, этот ток создает магнитный поток в магнитопроводе трансформатора. Активная составляющая обеспечивает поступление в трансформатор электрической энергии, необходимой для компенсации потерь энергии в стали магнитопровода. Она невелика, поэтому ток холостого хода практически можно считать равным намагничивающему току:  $I_0 \approx I_{0p}$ . При проектировании трансформаторов магнитное сопротивление магнитопровода стремятся сделать малым, чтобы ток холостого хода для мощных трансформаторов составлял 3—4%, а трансформаторов средней мощности — 8—10% номинального тока.

Э. д. с, индуцированные в первичной и вторичной обмотках, согласно закону электромагнитной индукции пропорциональны скорости изменения магнитного потока. Следовательно, они пропорциональны максимальному значению магнитного потока  $\Phi_m$  и частоте его изменения. В каждом витке первичной и вторичной обмоток индуцируется э. д. с, действующее значение которой  $E_B = 4,44 f \Phi_T$ , где  $4,44 = 2\sqrt{2}$  — постоянная.

Соответственно:

$$E_1 = 4,44 f \omega_1 \Phi_T; E_2 = 4,44 f \omega_2 \Phi_T$$

При холостом ходе э. д. с.  $E_1$  практически равна питающему напряжению  $U_1$ , так как падение напряжения в первичной обмотке, создаваемое небольшим током холостого хода, мало. Если изменяется напряжение  $U_1$ , то будут меняться э. д. с.  $E_1$ , магнитный поток  $\Phi$  и ток холостого хода  $I_0$ . Зависимость э. д. с.  $E_1$  от тока холостого хода называется характеристикой холостого хода (рис. 221, а). При малых напряжениях  $U_1$  и э. д. с.  $E_1$  магнитный поток трансформатора мал, и для его создания требуется небольшой ток холостого хода. В этом случае магнитная система трансформатора не насыщена и ток  $I_0$  возрастает пропорционально  $U_1$  (так же как и ток возбуждения в генераторе постоянного тока). При дальнейшем увеличении напряжения  $U_1$  магнитная цепь трансформатора насыщается и ток  $I_0$  начинает расти быстрее, чем э. д. с.  $E_1$ . Значительное увеличение напряжения  $U_1$  выше номинального недопустимо, так как при этом резко увеличивается ток холостого хода.

**Нагрузочный режим.** При подключении нагрузки  $Z_H$  к вторичной обмотке трансформатора (рис. 222) он начинает отдавать нагрузке некоторую мощность. Соответственно увеличивается и мощность, получаемая первичной обмоткой из питающей сети. Следовательно, при увеличении тока  $i_2$  во вторичной обмотке возрастает и ток  $i_1$  в первичной обмотке.

Магнитный поток трансформатора определяется значением питающего напряжения  $U_1$  и практически не зависит от нагрузки. Поэтому результирующая м. д. с., создаваемая при нагрузке то-

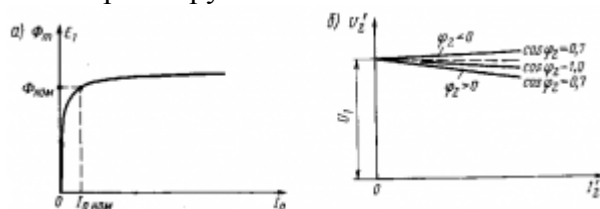


Рис. 221. Характеристики силовых и выпрямительных трансформаторов: а — холостого хода; б — внешние ( $\varphi_2 > 0$  — активно-индуктивная нагрузка,  $\varphi_2 < 0$  — активно-емкостная)

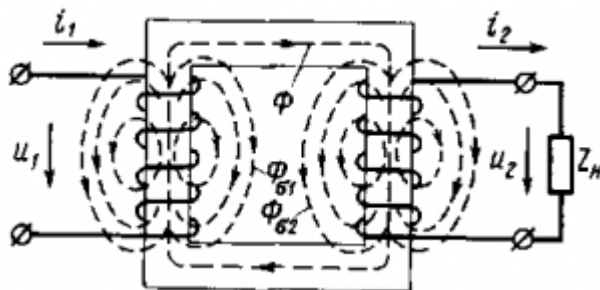


Рис. 222. Схема магнитных потоков в трансформаторе при нагрузке

ками  $i_1$  и  $i_2$ , должна оставаться такой же, как и при холостом ходе:

$$F_1 + F_2 = F_0$$

где

$F_1 = I_1 \omega_1$  — м. д. с. первичной обмотки при нагрузке;

$F_2 = I_2 \omega_2$  — м. д. с. вторичной обмотки при нагрузке;

$F_0 = I_0 \omega_0$  — м. д. с. первичной обмотки при холостом ходе.

Уравнение (78) называется уравнением равновесия магнитодвижущих сил трансформатора. Если поделить обе его части на  $\omega_1$ , то получим:  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \omega_2 / \omega_1$ , откуда следует, что наличие тока  $I_2$  во вторичной обмотке трансформатора вызывает автоматически увеличение тока  $I_1$  в первичной обмотке. Обычно в трансформаторах большой и средней мощности ток  $I_0$  составляет несколько процентов от номинального значения тока  $I_0$ . Поэтому при нагрузках, близких к номинальной, можно считать, что  $\dot{I}_1 \approx \dot{I}_2 \omega_2 / \omega_1$

Токи  $i_1$  и  $i_2$ , проходя по обмоткам трансформатора, создают в них падения напряжения — активные и реактивные (индуктивные). Активные падения напряжения

возникают в результате прохождения токов  $i_1$  и  $i_2$  по активным сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$  обмоток. Реактивные падения напряжения обуславливаются действием потоков рассеяния  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , создаваемых токами  $i_1$  и  $i_2$ . В отличие от основного потока  $\Phi$ , который замыкается по сердечнику и сцеплен одновременно с обеими обмотками, потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  сцеплены каждый только со своей собственной обмоткой и индуцируют в них э. д. с. самоиндукции  $e_{L1}$  и  $e_{L2}$ . Эти э. д. с., как было показано в § 51, создают индуктивные сопротивления  $X_1$  и  $X_2$  обмоток, в которых при прохождении токов  $i_1$  и  $i_2$  возникают падения напряжения.

Для определения изменения вторичного напряжения трансформатора при нагрузке напряжения  $U_2$  обычно приводят к первичному, умножая его на коэффициент трансформации п. т. е.  $U'_2 = U_2 n$ . Точно так же приводят к первичной обмотке ток  $I_2$ , умножая его на  $1/n$ , т. е.  $I'_2 = I_2/n$ . Величины  $U'_2$  и  $I'_2$  называются приведенными вторичным напряжением и вторичным током.

Изменение вторичного напряжения можно определить по внешней характеристике трансформатора (см. рис. 221,б), которая представляет собой графическую зависимость приведенного вторичного напряжения  $U'_2$  от приведенного вторичного тока  $I'_2$ . При холостом ходе приведенное вторичное напряжение  $U'_2$  будет равно

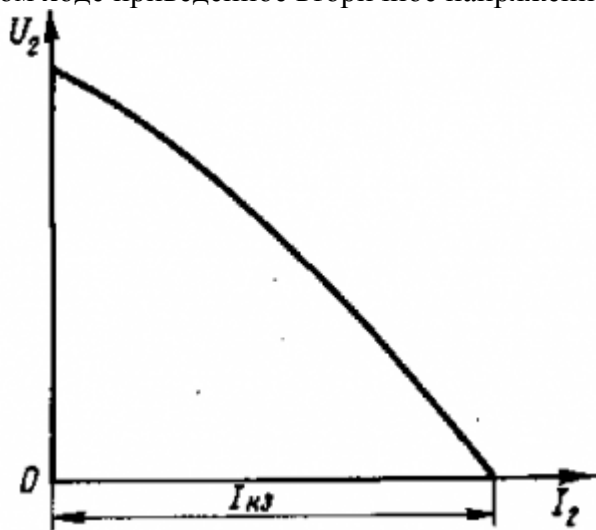


Рис. 223. Внешняя характеристика

сварочного трансформатора

первичному  $U_1$ , при нагрузке же из-за падений напряжений в сопротивлениях  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$  и  $X_2$  первичной и вторичной обмоток оно будет меньше  $U_1$ . В трансформаторах средней и большой мощности реактивное падение напряжения обычно в несколько раз превышает активное. Поэтому и активно-индуктивная нагрузка вызывает большее изменение напряжения, чем активная (изменение напряжения возрастает с уменьшением  $\cos \varphi_2$  в цепи нагрузки). В трансформаторах малой мощности, наоборот, активное падение напряжения обычно больше реактивного и изменение напряжения уменьшается с увеличением  $\cos \varphi_2$ .

Обычно изменение напряжения  $\Delta u$  при работе трансформатора под нагрузкой определяют при номинальном значении первичного напряжения  $U_{1НОМ}$  и выражают в процентах:

$$\Delta u\% = [(U_{1НОМ} - U_{2n}) / U_{1НОМ}] 100$$

Величину  $\Delta u$  % иногда называют относительной потерей напряжения в трансформаторе. В силовых и выпрямительных трансформаторах изменение напряжения при номинальном токе обычно составляет 2—6% (в зависимости от  $\cos \varphi_2$ ).

Короткое замыкание. В паспорте трансформатора указывают не изменение напряжения, которое различно для разных  $\cos \varphi_2$ , а результирующее падение напряжения в его обмотках при номинальном нагрузочном токе. Это падение напряжения называют напряжением короткого замыкания, и его можно определить опытным путем, если питать

трансформатор с замкнутой накоротко вторичной обмоткой пониженным напряжением  $U_K$  (опыт короткого замыкания). В этом случае напряжение  $U_K$  будет равно такому напряжению  $U_1$ , при котором по обмоткам замкнутого накоротко трансформатора протекают номинальные токи.

Напряжение короткого замыкания является весьма важным эксплуатационным показателем, его выражают в процентах от  $U_{1НОМ}$ :

$$u_k\% = (U_k / U_{1НОМ}) 100$$

Для трансформаторов средней мощности  $u_k\% = 5-7\%$ , для мощных трансформаторов  $6-12\%$ .

Если короткое замыкание происходит в процессе эксплуатации трансформатора при номинальном напряжении, то в обеих обмотках возникают большие токи, превышающие номинальное значение в  $10-20$  раз, при этом повышается температура обмоток и на них действуют большие электромагнитные силы. Такое замыкание является аварийным и требует специальной защиты, которая должна отключить трансформатор в течение долей секунды. Установившийся ток короткого замыкания трансформатора в общем случае

$$I_k = I_{ном} (100 / u_k\%)$$

где  $I_{ном}$  — номинальный ток первичной обмотки.

Для ограничения токов короткого замыкания мощные трансформаторы выполняют с повышенными значениями  $u_k\%$ , т. е. с повышенным внутренним индуктивным сопротивлением обмоток.

Характеристики сварочных трансформаторов. В некоторых случаях желательно, чтобы трансформатор имел крутопадающую внешнюю характеристику (рис. 223). Такую характеристику должны, например, иметь сварочные трансформаторы, так как она обеспечивает устойчивое горение электрической дуги. Кроме того, при электросварке режим короткого замыкания является нормальным рабочим режимом и при крутопадающей характеристике ток  $I_{кз} \approx I_{ном}$ .

Для получения крутопадающей характеристики последовательно с вторичной обмоткой трансформатора включают реактор с большим индуктивным сопротивлением (рис. 224, а). В некоторых конструкциях сварочных трансформаторов магнитопровод добавочного реактора совмещают с магнитопроводом трансформатора (рис. 224, б). Регулирование тока  $I_2$  электрической дуги осуществляется в таких трансформаторах двумя способами: ступенчатое — путем изменения числа витков вторичной обмотки и плавное — путем изменения воздушного зазора  $d$ . При изменении воздушного зазора изменяется индуктивность реактора и, следовательно, наклон внешней характеристики трансформатора.

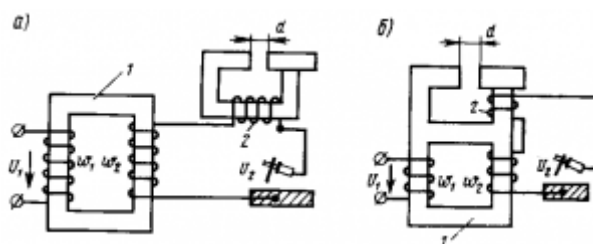


Рис. 224. Принципиальные схемы сварочных трансформаторов: а — с внешней индуктивностью (реактором), б — с реактором на общем сердечнике; 1 — трансформатор; 2 — реактор

### 3.9 Назначение и принцип действия. Устройство асинхронных двигателей. Серии асинхронных двигателей.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Назначение. Асинхронные машины — наиболее распространенные электрические машины. Особенно широко они используются как электродвигатели и являются



основными преобразователями электрической энергии в механическую. В настоящее время асинхронные электродвигатели потребляют около половины всей вырабатываемой в мире электроэнергии и находят широкое применение в качестве электропривода подавляющего большинства механизмов. Это объясняется простотой конструкции, надежностью и высоким значением КПД этих электрических машин.

Открытие асинхронных машин относится к 80-м годам прошлого столетия. Их создание связывают с именами итальянского ученого Г. Феррариса, югославского ученого Н. Тесла и русского ученого М. О. Доливо-Добровольского. Г. Феррарис и Т. Тесла независимо друг от друга в 1888 г. предложили способ получения двухфазного вращающегося поля и создали первые асинхронные машины. Однако эти двигатели не получили широкого применения.

Большую роль в создании асинхронных Двигателей сыграл М. О. Доливо-Добровольский. В 1889 г. он впервые использовал трехфазный ток для получения вращающегося магнитного поля, применил на статоре распределенную трехфазную обмотку и обмотку ротора в виде беличьей клетки. Он также предложил трехфазную обмотку ротора, выведенную на контактные кольца, и использовал для пуска двигателя реостат, подключаемый к обмотке ротора через контактные кольца.

Почти за 100 лет существования асинхронных двигателей в них совершенствовались применяемые материалы, конструкция отдельных узлов и деталей, технология их изготовления; однако принципиальные конструкторские решения, предложенные М. О. Доливо-Добровольским, в основном остались неизменными. В дальнейшем большое применение получили также и однофазные асинхронные двигатели в основном для электробытовых приборов. Появилось также большое количество разновидностей и модификаций асинхронных машин, в частности асинхронные исполнительные двигатели, тахогенераторы, сельсины, поворотные трансформаторы и др.

Большой вклад в теорию асинхронных машин внесли советские ученые Б. П. Апаров, М. П. Костенко, Г. Н. Петров, К. И. Шенфер и др. В СССР впервые в мировой практике с 1946 г. асинхронные двигатели выпускаются едиными всесоюзными сериями. На базе единых серий в нашей стране организовано высокomeханизированное и автоматизированное крупносерийное производство на основе широкой специализации и кооперации. Большие преимущества имеют единые серии и в эксплуатации — они значительно облегчают выбор, установку, обслуживание и ремонт электрооборудования. В 70-х годах была разработана и внедрена единая серия асинхронных двигателей 4А. Одновременно с конструкцией двигателей разрабатывались электротехническая сталь, провода, изоляция и технология. В 80-х годах организацией социалистических стран «Интерэлектро» разработана новая унифицированная серия асинхронных двигателей АИ, предназначенная для использования во всех странах - членах СЭВ. Машины серии АИ, которые производятся во всех этих странах, отличаются повышенными надежностью и перегрузочной способностью, расширенным диапазоном регулирования, лучшими массово-габаритными и энергетическими показателями, а также улучшенными виброакустическими характеристиками по сравнению с машинами серии 4А. В СССР впервые в мире разработана методика оптимизированного расчета асинхронных двигателей, учитывающая затраты как на производство, так и на эксплуатацию электродвигателей; расчет с помощью электронно-вычислительных машин ведется по минимуму суммарных затрат в народном хозяйстве. В теорию и практику создания единых серий асинхронных двигателей большой вклад внесли советские ученые и инженеры А. Г. Иосифьян, Б. И. Кузнецов, Э. Д. Кравчик, В. И. Радин, Т. Г. Сорокер, И. Н. Чарахчян и др.

Принцип действия. В асинхронной машине одну из обмоток размещают на статоре 1 (рис. 4.1, а), а вторую - на роторе 3. Между ротором и статором имеется воздушный зазор, который для улучшения магнитной связи между обмотками делают по возможности малым. Обмотка статора 2 представляет собой трехфазную (или в общем

случае многофазную) обмотку, катушки которой размещают равномерно по окружности статора. Фазы обмотки статора AX, BY и CZ соединяют по схеме Y или Δ и подключают к сети трехфазного тока (рис. 4.1,6). Обмотку ротора 4 выполняют трехфазной или многофазной и размещают равномерно вдоль окружности ротора. Фазы ее в простейшем случае замыкают накоротко.

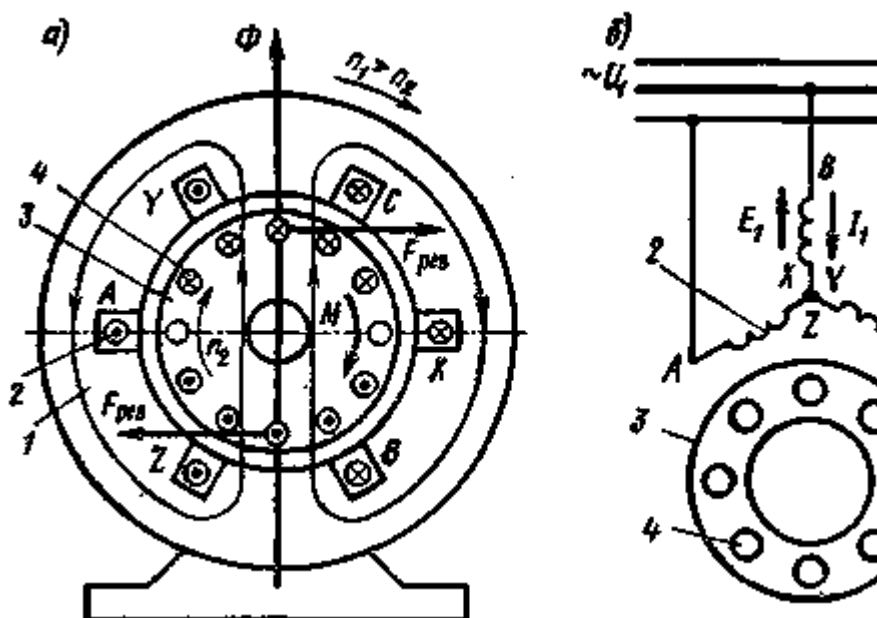


Рис. 4.1. Электромагнитная схема асинхронной машины, направления токов и электромагнитного момента при работе в двигательном режиме

При питании обмотки статора трехфазным током создается вращающееся магнитное поле, частота вращения которого (синхронная)

$$n_1 = 60f_1 / p.$$

Если ротор неподвижен или частота его вращения меньше синхронной, то вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. На рис. 4.1, а показано, согласно правилу правой руки, направление ЭДС, индуцированной в проводниках ротора при вращении магнитного потока  $\Phi$  по часовой стрелке, при этом проводники ротора перемещаются относительно потока  $\Phi$  против часовой стрелки. Активная составляющая тока ротора совпадает по фазе с индуцированной ЭДС; поэтому условные обозначения (крестики и точки) на рис. 4.1 показывают одновременно и направление активной составляющей тока.

На проводники с током, расположенные в магнитном поле, действуют электромагнитные силы, направление которых определяется правилом левой руки. Суммарное усилие  $F_{рез}$ , приложенное ко всем проводникам ротора, образует электромагнитный момент  $M$ , увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем. Если этот момент достаточно велик, то ротор приходит во вращение и его установившаяся частота вращения  $n_2$  соответствует равенству электромагнитного момента тормозному, создаваемому приводимым во вращение механизмом и внутренними силами трения. Такой режим работы асинхронной машины является двигательным, очевидно, в данном случае  $0 \leq n_2 < n_1$ .

Относительную разность частот вращения магнитного поля и ротора называют скольжением:

$$(4.1)$$

$$s = (n_1 - n_2)/n_1.$$

Скольжение часто выражают в процентах

(4.1a)

$$s = [(n_1 - n_2)/n_1] \cdot 100.$$

Очевидно, что при двигательном режиме  $1 > s > 0$ .

Если ротор асинхронной машины разогнать с помощью внешнего момента (например, каким-либо двигателем) до частоты, большей частоты вращения магнитного поля  $n_1$  то изменится направление ЭДС в проводниках ротора и активной составляющей тока ротора, т. е. асинхронная машина перейдет в генераторный режим (рис. 4.2, а). При этом изменит свое направление и электромагнитный момент  $M$ , который станет тормозящим. В генераторном режиме асинхронная машина получает механическую энергию от первичного двигателя, превращает ее в электрическую и отдает в сеть, при этом  $s < 0$ .

Если изменить направление вращения ротора (или магнитного поля) так, чтобы магнитное поле и ротор вращались в противоположных направлениях (рис. 4.2, б), то ЭДС и активная составляющая тока в проводниках ротора будут направлены так же, как в двигательном режиме, т. е. машина будет получать из сети активную мощность. Однако в данном

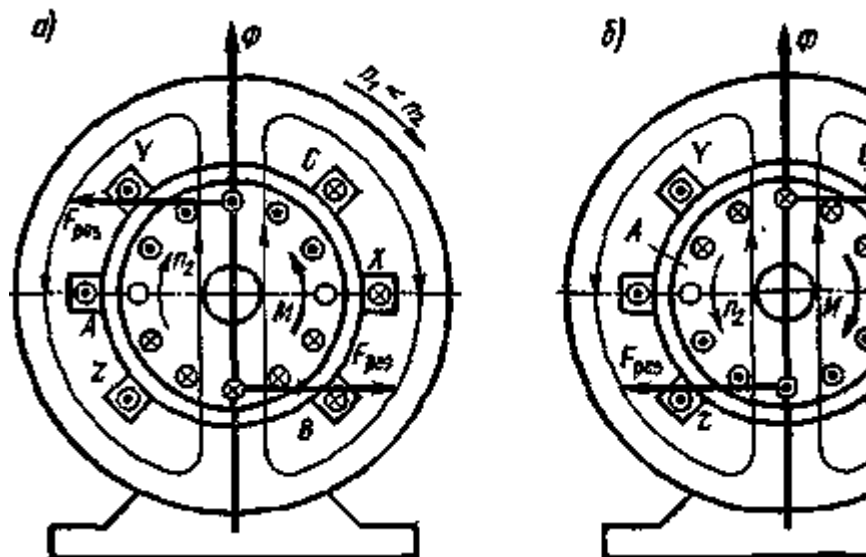


Рис. 4.2.  
Электромагнитная  
схема асинхронной  
машины,  
направления токов  
и  
электромагнитного  
момента при  
работе ее в  
режимах:

режиме электромагнитный момент  $M$  направлен против вращения ротора, т. е. является тормозящим. Этот режим работы асинхронной машины называют режимом электромагнитного торможения. Так как ротор вращается в обратном направлении (относительно направления магнитного поля), то  $n_2 < 0$ , а  $s > 1$ .

Таким образом, характерной особенностью асинхронной машины является наличие скольжения, т. е. неравенство частот вращения  $n_1$  и  $n_2$ . Только при указанном условии в проводниках обмотки ротора индуцируется ЭДС и возникает электромагнитный момент. Поэтому машину называют асинхронной (ее ротор вращается несинхронно с полем).

На практике обычно встречается двигательный режим асинхронной машины, поэтому теория асинхронных машин изложена здесь применительно к этому режиму с последующим обобщением ее на другие режимы работы.

### 3.10 Работа асинхронного двигателя при неподвижном роторе. Работа асинхронного двигателя при вращающемся роторе. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Рабочими характеристиками называют графические зависимости частоты вращения  $n_2$  (или скольжения  $s$ ), момента на валу  $M_2$ , тока статора  $I_1$ , коэффициента полезного действия  $\eta$  и  $\cos \varphi_1$  от полезной мощности  $P_2$  при  $U_1 = \text{const}$  и  $f_1 = \text{const}$ . Их определяют экспериментально или путем расчета по схеме замещения или круговой диаграмме.

Примерный вид рабочих характеристик асинхронного двигателя показан на рис. 4.25. Частота вращения, ток статора, момент на валу, потребляемая и полезная мощности приведены на графике в относительных единицах. Рабочие характеристики строят только для зоны практически устойчивой работы двигателя, т. е. до скольжения  $(1,1 \div 1,2)s_{\text{ном}}$ .

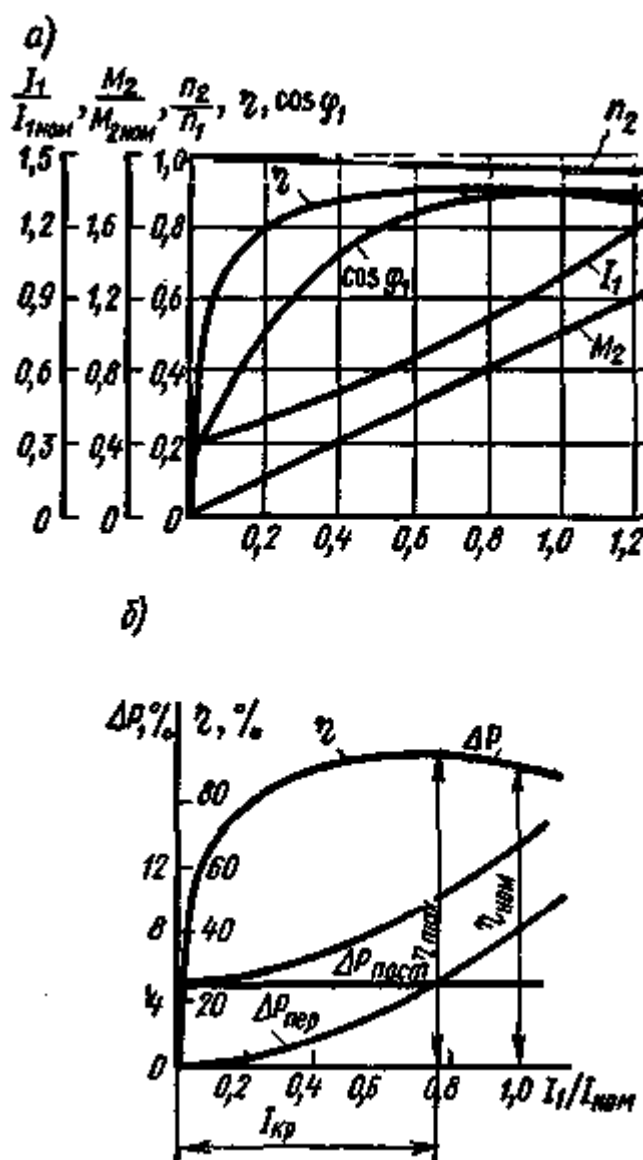


Рис. 4.25. Рабочие характеристики асинхронного двигателя (а) и типичная кривая КПД электрической машины и ее потерь (б)

**Частота вращения ротора.** При переходе от режима холостого хода к режиму полной нагрузки частота вращения  $n_2$  изменяется незначительно, так как при проектировании двигателей для уменьшения потерь мощности в роторе  $\Delta P_{\text{эл2}}$  необходимо, чтобы скольжение при номинальном режиме не превышало 0,02—0,06. Следовательно, скоростная характеристика асинхронного двигателя является «жесткой».

Характеристики  $n_2 = f(P_2)$  и  $n_2 = f(M)$  можно построить по круговой диаграмме. Для этого задаются рядом точек на окружности токов и находят соответствующие им значения полезной мощности, электромагнитного момента и скольжения. При расчетах, не требующих большой точности, полезную мощность  $P_2$  принимают равной  $P_{\text{мех}}$  (пренебрегая потерями мощности  $\Delta P_T$ ), т. е. считают, что она пропорциональна отрезку  $\overline{AM}$  круговой диаграммы (см. рис. 4.17). Более точно ее определяют путем построения на круговой диаграмме специальной линии полезной мощности  $O''K$  (см. рис. 4.18,6), которую получают, соединя точку  $O''$  реального холостого хода с точкой  $K$  (в режимах, соответствующих точкам  $O$  и  $K$ , мощность  $P_2 = 0$ ). В этом случае величина  $P_2$  пропорциональна отрезку  $AM$ , заключенному между окружностью токов и линией  $O''K$ .

Электромагнитный момент пропорционален отрезку  $\overline{AE}$  круговой диаграммы (см. рис. 4.17). Чтобы определить максимальный момент (рис. 4.26, а), через точку  $A_M$  проводят касательную к окружности токов параллельно линии  $OT$  и из этой точки опускают перпендикуляр на диаметр окружности токов. Максимальный момент пропорционален отрезку  $\overline{A_M E_M}$ , где  $E_M$  - точка пересечения перпендикуляра с прямой  $OT$ .

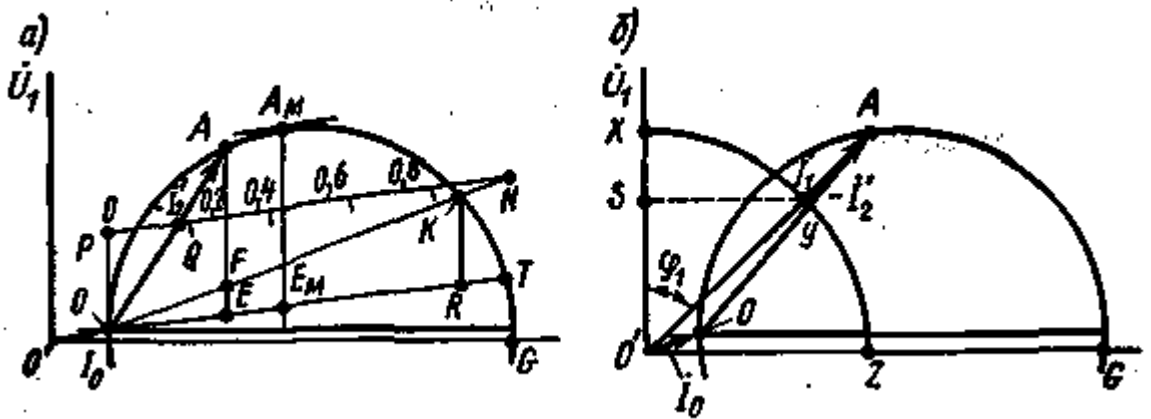


Рис. 4.26. Круговая диаграмма со шкалами скольжения (а) и  $\cos \varphi$  (б)

Скольжение  $s = \Delta P_{\text{эл2}} / P_{\text{эм}}$  можно найти по круговой диаграмме как отношение отрезков  $\overline{FE} / \overline{AE}$ . Однако поскольку измерение малого отрезка  $\overline{FE}$  может дать существенную погрешность, для определения  $s$  надо построить шкалу скольжения (рис. 4.26, а). Для этого на произвольном расстоянии от линии  $O'G$  проводят прямую, параллельную линии  $OT$ , до пересечения ее с линией  $OK$  (или с ее продолжением) и получают точку  $N$ . Затем из точки  $O$  восстанавливают перпендикуляр к диаметру окружности до пересечения с построенной прямой и находят точку  $P$ . Линия  $OA$  (вектор тока  $-I'_2$ ) пересекается с прямой  $PN$  в точке  $Q$ . Из подобия полученных при таком построении треугольников ( $\triangle OFE \sim \triangle OPN$  и  $\triangle OAF \sim \triangle OPQ$ ) имеем

$$\frac{\overline{FE}}{\overline{OP}} = \frac{\overline{OE}}{\overline{PN}}; \quad \frac{\overline{OP}}{\overline{AE}} = \frac{\overline{PQ}}{\overline{OE}}.$$

Перемножая эти отношения, находим

(4.55)

$$\frac{\overline{FE}}{\overline{AE}} = \frac{\overline{PQ}}{\overline{PN}} = s.$$

Следовательно, линия  $\overline{PN}$  представляет собой шкалу скольжения, на которой отрезок  $PQ$ , отсекаемый линией  $OA$  (вектором  $-I'_2$ ), позволяет получить скольжение  $s$ . Зная скольжение  $s$ , по формуле  $n_2 = n_1 (1 - s)$  можно определить частоту вращения ротора.

**Вращающий момент на валу двигателя.** Зависимость между моментом  $M_2$  и полезной мощностью  $P_2$  определяется соотношением

(4.56)

$$P_2 = M_2 \omega_2,$$

где  $\omega_2$  — угловая скорость ротора.

Поскольку  $n_2$  изменяется мало, эта зависимость близка к линейной. Чтобы определить момент  $M_2$  на валу двигателя, по круговой диаграмме находят электромагнитный момент  $M$ , а затем из него вычитают момент, обусловленный трением в двигателе, —  $M_T = \Delta P_T / \omega_2$  :

$$M_2 = M - M_T.$$

**Ток статора.** Ток  $I_1$  получают по круговой диаграмме непосредственным измерением отрезков, соединяющих начало координат с точками  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и другими на окружности токов. Активная составляющая тока пропорциональна полезной мощности. Реактивная составляющая в диапазоне рабочих нагрузок изменяется мало, так как она определяется главным образом током холостого хода, который составляет 20—40% от номинального тока.

**Коэффициент мощности.** При переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки коэффициент мощности возрастает от значения  $\cos \phi_1 = 0,09 \div 0,18$  до некоторой максимальной величины: для двигателей малой и средней мощности (1 - 100 кВт)  $\cos \phi_1 = 0,7 \div 0,9$ , а для двигателей большой мощности (свыше 100 кВт)  $\cos \phi_1 = 0,90 \div 0,95$ . При дальнейшем увеличении нагрузки  $\cos \phi_1$  несколько уменьшается. Следовательно, работа асинхронного двигателя при малых нагрузках, когда  $\cos \phi_1$  мал, в энергетическом отношении невыгодна. Величину  $\cos \phi_1$  можно определить по круговой диаграмме, если построить на ней дополнительную шкалу. Такой шкалой является отрезок  $O'X$  (рис. 4.26,б), отсекаемый на оси ординат вспомогательной окружностью  $XYZ$  произвольного радиуса (его целесообразно принять равным 100 единицам длины). Для определения  $\cos \phi_1$  на линию  $O'X$  проектируют отрезок  $O'Y$ , полученный путем пересечения линии  $OA$  (вектора тока  $\dot{I}_1$ ) с окружностью  $XYZ$ . При этом отрезок  $O'S$  позволяет определить величину  $\cos \phi_1$ .

В двигателях с фазным ротором кривые  $\eta$  и  $\cos \phi_1$  располагаются несколько ниже, чем у соответствующих двигателей с короткозамкнутым ротором. На это влияют следующие причины:

- а) возникновение дополнительных потерь мощности в результате наличия щеток на контактных кольцах;
- б) уменьшение полезной мощности из-за худшего использования объема ротора (обмотку ротора выполняют из изолированного провода, вследствие чего пазы ротора частично заполняются изоляцией);
- в) увеличение намагничивающего тока из-за возрастания магнитного сопротивления зубцовпазового слоя ротора в результате уменьшения поперечного сечения зубцов.

**Коэффициент полезного действия.** Зависимость  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  имеет такой же характер, как и для трансформатора. Эта зависимость имеет общий характер для большинства электрических машин.

При изменении нагрузки электрической машины отдельные виды потерь изменяются по-разному: электрические потери  $\Delta P_{эл}$  в обмотках статора и ротора, а также добавочные потери  $\Delta P_{доб}$  изменяются пропорционально квадрату тока нагрузки; электрические потери в щеточном контакте  $\Delta P_{щ}$  изменяются пропорционально току в первой степени; механические  $\Delta P_T$  и магнитные  $\Delta P_M$  потери остаются практически постоянными - такими же, как при холостом ходе, если напряжение машины  $U_1$  и частота ее вращения  $n_2$  не изменяются. По этому признаку все виды потерь можно разделить на две группы: *постоянные потери*  $\Delta P_{пост} = \Delta P_M + \Delta P_T$  и *переменные потери*  $\Delta P_{пер} = \Delta P_{эл} + \Delta P_{щ, эл} + \Delta P_{доб}$ , которые можно приближенно считать пропорциональными квадрату тока

нагрузки (обычно потери  $\Delta P_{\text{ш. эл}}$  малы по сравнению с  $\Delta P_{\text{эл}}$ ). Мощность  $P_2$ , отдаваемая машиной ( $P_{\text{эл}}$  в генераторах и  $P_{\text{мех}}$  в двигателях), пропорциональна току нагрузки  $I$  в первой степени, поэтому зависимость КПД от тока нагрузки

(4.57)

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \Delta P_{\text{пост}} + \Delta P_{\text{пер}}) = AI / (AI + B + CI^2),$$

где  $A$ ,

$B$ ,

$C$

— постоянные.

Из (4.57) следует, что при изменении нагрузки электрической машины ее КПД изменяется, как показано на рис. 4.25,6. При холостом ходе  $\eta = 0$ , так как полезная мощность  $P_2$  отсутствует. При увеличении нагрузки КПД возрастает за счет увеличения  $P_2$ , но одновременно быстрее, чем  $P_2$ , возрастают переменные потери  $\Delta P_{\text{пер}}$ , поэтому при некотором токе  $I_{\text{кр}}$  увеличение КПД прекращается и в дальнейшем начинает уменьшаться. Если взять производную  $d\eta/dI$  и приравнять ее нулю, то можно получить условие максимума КПД — это наблюдается при такой нагрузке, при которой  $\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пост}}$ .

При проектировании электрической машины обычно так распределяют потери мощности, что указанное условие выполняется при наиболее вероятной нагрузке машины, несколько меньшей номинальной. Во вращающихся электрических машинах средней и большой мощности это условие выполняется при нагрузках примерно 60% от номинальной.

При увеличении номинальной мощности относительная величина суммарных потерь уменьшается. Следовательно, должен возрасти и КПД машины. Эта закономерность проявляется во всех типах вращающихся электрических машин и в трансформаторах — машины большей номинальной мощности всегда имеют соответственно и больший КПД, и, наоборот, КПД машин малой мощности и микромашин обычно невелик. Так, например, КПД вращающихся электрических машин мощностью свыше 100 кВт составляет 0,92 — 0,96, мощностью 1 — 100 кВт — 0,7—0,9, а микромашин — 0,4—0,6.

КПД асинхронного двигателя можно определить из круговой диаграммы как отношение отрезков  $\overline{AF} : \overline{AC}$  (на упрощенной диаграмме, см. рис. 4.18,а) или  $\overline{AM} : \overline{AC}$  (на уточненной диаграмме, см. рис. 4.18,б). Однако для получения более точных результатов КПД рекомендуется определять путем расчета отдельных видов потерь.

### 3.11 Пуск в ход трёхфазных асинхронных двигателей. Короткозамкнутые асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Частота вращения асинхронного двигателя

$$n = n_1 (1 - s) = (60f_1/p) (1-s) \quad (85)$$

Из этого выражения видно, что ее можно регулировать, изменяя частоту  $f_1$  питающего напряжения, число пар полюсов  $p$  и

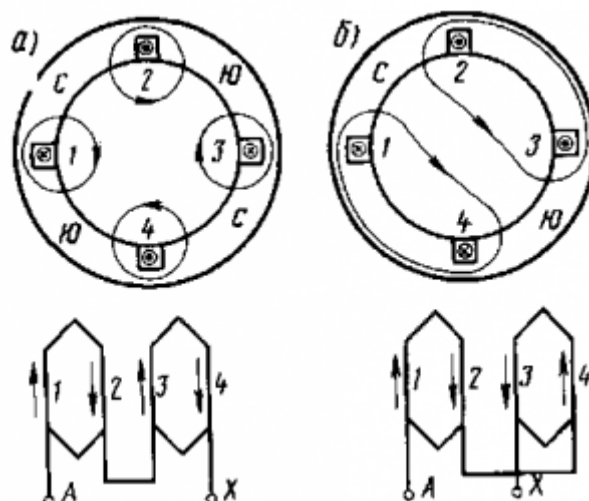


Рис. 266. Схема переключения катушек обмотки статора (одной фазы) для изменения числа полюсов: а — при четырех полюсах; б — при двух полюсах

скольжение  $s$ . Последнее при заданных значениях момента на валу  $M_{\text{вн}}$  и частоты  $f_1$  можно изменять путем включения в цепь обмотки ротора реостата.

**Регулирование путем изменения частоты питающего напряжения.** Этот способ требует наличия преобразователя частоты, к которому должен быть подключен асинхронный двигатель. На основе управляемых полупроводниковых вентилей (тириستоров) созданы статические преобразователи частоты и построен ряд опытных электровозов и тепловозов с асинхронными двигателями, частота вращения которых регулируется путем изменения частоты питающего напряжения. Такой способ регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя является весьма перспективным.

**Регулирование путем изменения числа пар полюсов.** Этот способ позволяет получить ступенчатое изменение частоты вращения. Для этой цели отдельные катушки 1, 2 и 3, 4, составляющие одну фазу (рис. 266), переключаются так, чтобы изменялось соответствующим образом направление тока в них (например, с последовательного согласного соединения на встречное). При согласном включении катушек (рис. 266, а) число полюсов равно четырем, при встречном включении (рис. 266, б) — двум. Катушки двух других фаз, сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$ , соединяются таким же образом. Такое же уменьшение числа полюсов можно осуществить при переключении катушек с последовательного на параллельное соединение. При изменении числа полюсов изменяется частота вращения  $n_1$  магнитного поля двигателя, а следовательно, и частота вращения  $n$  его ротора. Если нужно иметь три или четыре частоты вращения  $n_1$ , то на статоре располагают еще одну обмотку, при переключении которой можно получить еще две частоты. Существуют двигатели, которые обеспечивают изменение частоты вращения  $n_1$  при постоянном наибольшем моменте или при приблизительно постоянной мощности (рис. 267).

В асинхронном двигателе число полюсов ротора должно быть равно числу полюсов статора. В короткозамкнутом роторе это условие выполняется автоматически и при переключении обмотки статора никаких изменений в обмотке ротора выполнять не требуется.



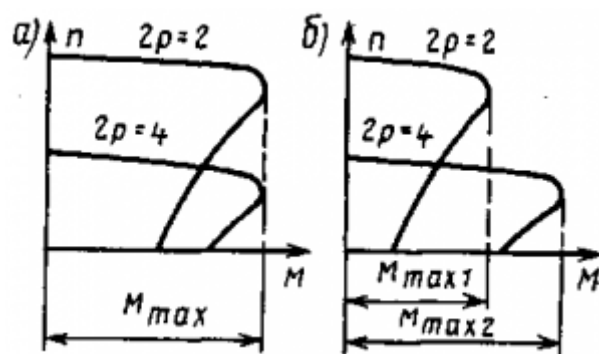


Рис. 267. Механические характеристики двухскоростных асинхронных двигателей с постоянным наибольшим моментом (а) и постоянной мощностью (б)

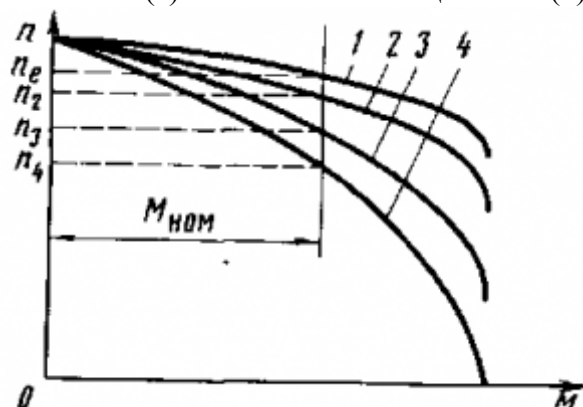


Рис. 268. Механические характеристики асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения путем включения реостата в цепь обмотки ротора

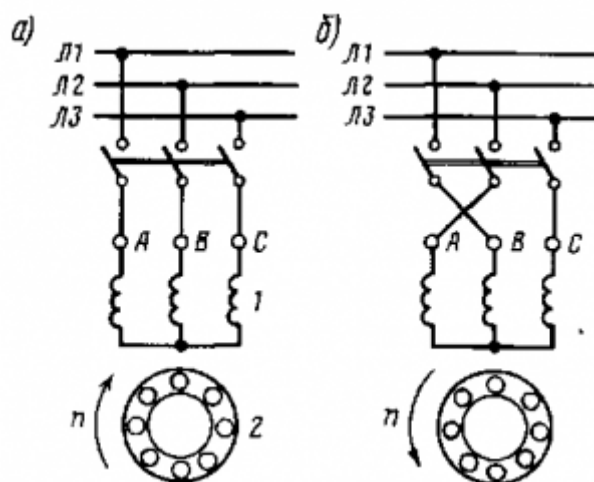


Рис. 269. Схемы подключения асинхронного двигателя к сети при изменении направления его вращения

В двигателе же с фазным ротором в этом случае надо было бы изменять число полюсов обмотки ротора, что сильно усложнило бы его конструкцию, поэтому такой способ регулирования частоты вращения используется только в двигателях с короткозамкнутым ротором. Такие двигатели имеют большие габаритные размеры и массу по сравнению с двигателями общего применения, а следовательно, и большую стоимость. Кроме того, регулирование осуществляется большими ступенями; при частоте  $f_1 = 50$  Гц частота вращения поля  $n_1$  при переключениях изменяется в отношении 3000:1500:1000:750.

**Регулирование путем включения в цепь ротора реостата.** При включении в цепь обмотки ротора реостата с различным сопротивлением ( $R_{п4}$ ,  $R_{п3}$ ,  $R_{п2}$  и т. д.) получаем ряд реостатных механических характеристик 4, 3 и 2 двигателя. При этом некоторому

нагрузочному моменту  $M_{ном}$  (рис. 268) будут соответствовать меньшие частоты вращения  $n_4, n_3, n_2$  и т. д., чем частота  $n_e$  при работе двигателя на естественной характеристике 1 (при  $R_{п} = 0$ ). Это способ регулирования может быть использован только для двигателей с фазным ротором. Он позволяет плавно изменять частоту вращения в широких пределах. Недостатками его являются большие потери энергии в регулировочном реостате, поэтому его используют только при кратковременных режимах работы двигателя (при пуске и пр.).

**Изменение направления вращения.** Для изменения направления вращения двигателя нужно изменить направление вращения магнитного поля, создаваемого обмотками статора. Это достигается изменением порядка чередования тока в фазах обмотки статора. Например, если максимумы токов поступают в фазы обмотки статора 1 (рис. 269, а) в следующем порядке: фаза А — фаза В — фаза С, то ротор 2 двигателя будет вращаться по часовой стрелке. Если же подавать их в такой последовательности: фаза В — фаза А — фаза С, то ротор начнет вращаться против часовой стрелки. Для этой цели необходимо изменить схему соединения обмоток статора с сетью, переключив две любые фазы (провода). Например, зажим А обмотки статора, который ранее был соединен с линейным проводом Л1, нужно переключить на провод Л2, а зажим В этой обмотки, соединенный ранее с Л2, переключить на провод Л1 (рис. 269,б). Такое переключение можно осуществить обычным переключателем.

### **3.12 Устройство и принцип действия однофазного асинхронного двигателя. Асинхронный конденсаторный двигатель. Работа трёхфазного асинхронного двигателя от однофазной сети. Специальные режимы работы асинхронных машин.**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

**Режимы работы асинхронных двигателей. Холостой ход.** Если пренебречь трением и магнитными потерями в стали (идеализированная машина), то ротор асинхронного двигателя при холостом ходе вращался бы с синхронной частотой  $n=n_1$  в ту же сторону, что и поле статора; следовательно, скольжение было бы равно нулю. Однако в реальной машине частота вращения ротора  $n$  при холостом ходе никогда не может стать равной частоте вращения  $n_1$ , так как в этом случае магнитное поле перестанет пересекать проводники обмотки ротора и в них не возникнет электрический ток. Поэтому двигатель в этом режиме не может развить вращающего момента и ротор его под влиянием противодействующего момента сил трения начнет замедляться. Замедление ротора будет происходить до тех пор, пока вращающий момент, возникший при уменьшенной частоте вращения, не станет равным моменту, создаваемому силами трения. Обычно при холостом ходе двигатель работает со скольжением  $s = 0,2-0,5 \%$ .

При холостом ходе в асинхронном двигателе имеют место те же электромагнитные процессы, что и в трансформаторе (обмотка статора аналогична первичной обмотке трансформатора, а обмотка ротора—вторичной обмотке). По обмотке статора проходит ток холостого хода  $I_0$ , однако его значение в асинхронном двигателе из-за наличия воздушного зазора между ротором и статором значительно больше, чем в трансформаторе (20—40 % номинального тока по сравнению с 3—10 % у трансформатора). Для уменьшения тока  $I_0$  в асинхронных двигателях стремятся выполнить минимально возможные по соображениям конструкции и технологии зазоры. Например, у двигателя мощностью 5 кВт зазор между статором и ротором обычно равен 0,2—0,3 мм. Ток холостого хода, так же как и в трансформаторе, имеет реактивную и активную составляющие. Реактивная составляющая тока холостого хода (намагничивающий ток) обеспечивает создание в двигателе требуемого магнитного потока, а активная составляющая — передачу в обмотку статора из сети энергии, необходимой для компенсации потерь мощности в машине в этом режиме.

**Нагрузочный режим.** Чем больше нагрузочный момент на валу, тем больше скольжение и тем меньше частота вращения ротора. Увеличение скольжения при возрастании момента объясняется

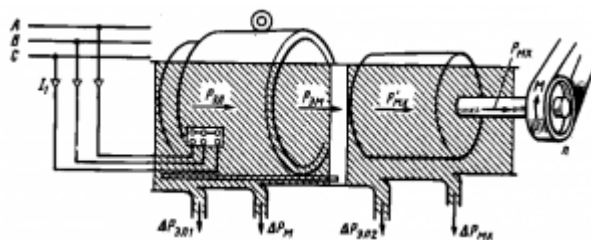


Рис. 260. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

следующим образом. При увеличении нагрузки на валу ротора он начинает тормозиться и частота его вращения  $n$  уменьшается. Но одновременно увеличивается частота  $n_1$  —  $n$  пересечения вращающимся полем проводников обмотки ротора, а следовательно, э. д. с.  $E_2$ , индуцированная в этой обмотке, ток в роторе  $I_2$  и образованный им электромагнитный вращающий момент  $M$ . Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока электромагнитный момент двигателя  $M$  не сравняется с нагрузочным моментом  $M_{вн}$ . При достижении равенства моментов  $M = M_{вн}$  торможение прекратится и двигатель будет снова вращаться с постоянной частотой вращения, но меньшей, чем до увеличения нагрузки. При уменьшении нагрузочного момента  $M_{вн}$  частота вращения ротора по той же причине будет увеличиваться. Обычно при номинальной нагрузке скольжение для двигателей средней и большой мощности составляет 2—4 %, а для двигателей малой мощности от 5 до 7,5 %.

При работе двигателя под нагрузкой по обмоткам его статора и ротора проходят токи  $i_1$  и  $i_2$ . Частота тока в обмотках статора  $f_1$  и ротора  $f_2$  определяется частотой пересечения вращающимся магнитным полем проводников соответствующей обмотки. Обмотка статора пересекается магнитным полем с частотой  $n_1$ , а обмотка вращающегося ротора — с частотой  $n_1 - n$ . Следовательно,

$$f_2/f_1 = (n_1 - n)/n_1 = s \text{ или } f_2 = f_1 s \quad (83)$$

Передача электрической энергии из статора в ротор происходит так же, как и в трансформаторе. Двигатель потребляет из сети электрическую мощность  $P_{эл} = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$  и отдает приводимому им во вращение механизму механическую мощность  $P_{мх}$  (рис. 260). В процессе преобразования энергии в машине имеют место потери мощности: электрические в обмотках статора  $\Delta P_{эл1}$  и ротора  $\Delta P_{эл2}$ , магнитные  $\Delta P_m$  от гистерезиса и вихревых токов в ферромагнитных частях машины и механические  $\Delta P_{мх}$  от трения в подшипниках и вращающихся частей о воздух. Из статора в ротор вращающимся электромагнитным полем передается электромагнитная мощность  $P_{эм}$  роторе она превращается в механическую мощность ротора  $P'_{мх}$ . Полезная механическая мощность на валу двигателя  $P_{мх}$  меньше мощности  $P'_{мх}$  на значение потерь мощности на трение  $\Delta P_{мх}$ .

При возрастании механической нагрузки на валу двигателя увеличивается ток  $I_2$ . В соответствии с этим возрастает и ток  $I_1$  в обмотке статора. Электромагнитный момент  $M$  создается в асинхронном двигателе в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с током  $I_2$ , индуцируемым им в проводниках обмотки статора. Однако в создании его участвует не весь ток  $I_2$ , а только его активная составляющая  $I_2 \cos \varphi_2$  (здесь  $\varphi_2$  — угол сдвига фаз между током  $I_2$  и э. д. с.  $E_2$  в обмотке ротора). Поэтому

$$M = c_m \Phi_T I_2 \cos \varphi_2 \quad (84)$$

где

$\Phi_T$  — амплитуда магнитного потока, созданного обмоткой статора;

$c_m$  — постоянная, определяемая конструктивными параметрами данной машины и не зависящая от режима ее работы.

Поясним физический смысл формулы (84). На рис. 261 изображен ротор двухполюсного асинхронного двигателя в развернутом виде, на котором кружками показаны поперечные сечения проводников. Крестики и точки внутри проводников обозначают направление в них тока  $i_2$ , а под проводниками — направление индуцированных э. д. с.  $e_2$ , которые пропорциональны индукции  $B$  в данной точке воздушного зазора между статором и ротором. Кривая  $B$  показывает распределение вдоль окружности ротора индукции, создаваемой вращающимся магнитным полем, кривая  $i_2$  — распределение тока в проводниках, а кривая  $f$  — распределение электромагнитных сил, возникающих в результате взаимодействия тока (а с вращающимся магнитным полем. Электромагнитный вращающий момент  $M$ , создаваемый в результате совместного действия всех сил  $f$ , будет пропорционален среднему значению электромагнитной силы  $f_{cp}$ . Легко заметить, что к проводникам, лежащим на дуге, равной  $180^\circ$  —  $\varphi_2$ , приложены силы  $f$ , увлекающие ротор за вращающимся магнитным полем, а на дуге  $\varphi_2$  — тормозящие силы. Поэтому при неизменном токе  $I_2$  среднее значение электромагнитной силы  $f_{cp}$ , а следовательно, и электромагнитный момент  $M$  будут тем больше, чем меньше угол  $\varphi_2$ . Электромагнитный момент  $M$  зависит от скольжения  $s$ .

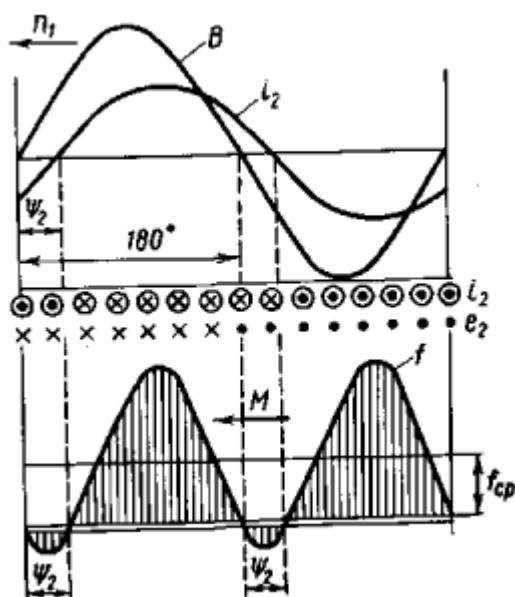


Рис. 261. Распределение индукции  $B$ , тока  $i_2$  и электромагнитных сил  $f$ , действующих на проводники асинхронного двигателя

Так, при увеличении скольжения возрастает э. д. с.  $E_2$  в обмотке ротора и ток  $I_2$ . Однако одновременно уменьшается  $\cos \varphi_2$ , так как активное сопротивление обмотки ротора  $R_2$  остается неизменным, а реактивное  $X_2$  увеличивается (возрастает частота тока  $f_2$  в обмотке ротора).

При  $s < 10-20\%$  увеличение скольжения приводит к незначительному уменьшению  $\cos \varphi_2$ , вследствие чего активная составляющая тока в обмотке ротора  $I_2 \cos \varphi_2$  и электромагнитный момент  $M$  возрастают.

При некотором критическом скольжении  $s_{кр}$  двигатель развивает наибольший момент  $M_{max}$ , который определяет его перегрузочную способность. При дальнейшем увеличении скольжения (большем  $s_{кр}$ ) происходит резкое уменьшение  $\cos \varphi_2$ , поэтому активная составляющая тока  $I_2 \cos \varphi_2$  и электромагнитный момент  $M$  уменьшаются.

Номинальный вращающий момент  $M_{ном}$  двигателя средней и большой мощности развивают при скольжении  $S_{ном} = 2-4\%$ .

Согласно государственным стандартам на асинхронные двигатели отношение  $M_{max}/M_{ном} = 1,8-2,5$ . Критическое скольжение  $s_{кр}$  для мощных двигателей составляет 5—10%, для двигателей средней и малой мощности — от 10 до 20 %.

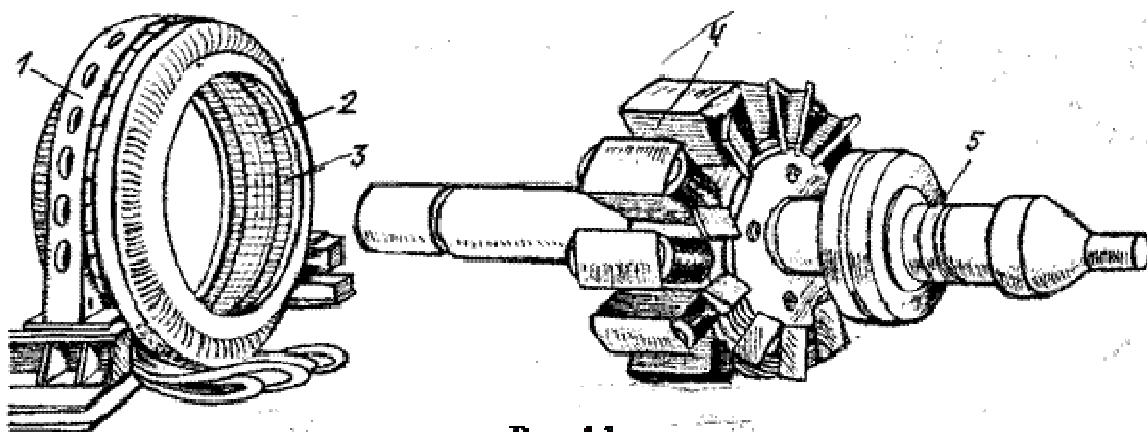
Асинхронный двигатель, как и любая электрическая машина, может работать в генераторном режиме, создавая тормозной момент. Этот режим используется для электрического торможения приводов.

**Режим пуска.** В начальный момент пуска ротор двигателя неподвижен: скольжение  $s=1$ , магнитное поле пересекает ротор с максимальной частотой, индуцируя в нем наибольшую э. д. с.  $E_2$ . Так как ток в роторе  $I_2$  определяется значением э. д. с.  $E_2$ , то в начальный момент пуска он будет наибольшим. Наибольшим будет и ток в статоре. Обычно пусковой ток двигателя в 5—7 раз больше номинального. Вращающий момент  $M_{\text{п}}$  при пуске называется пусковым. Он обычно меньше наибольшего момента, который может развить двигатель. Для двигателей различных типов и мощностей отношение  $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 0,7 - 1,8$ .

### 3.13 Принцип действия, назначение и номинальные данные синхронных машин. Устройство и конструктивное исполнение синхронных машин. Системы возбуждения синхронных машин.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

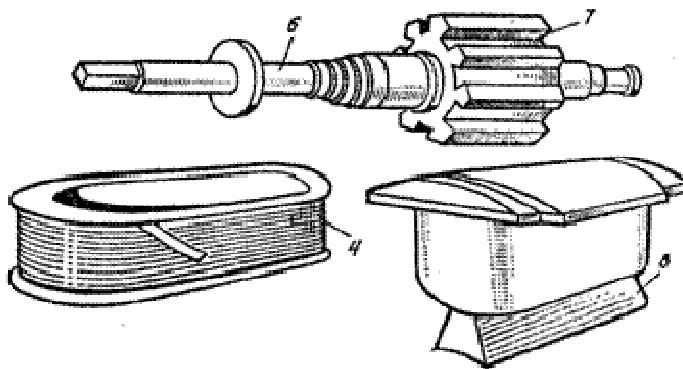
**Устройство синхронных машин.** Синхронные машины вне зависимости от режима работы состоят из двух основных частей: неподвижного статора, выполняющего функции якоря и ротора, вращающегося внутри статора и служащего индуктором (рис. 4.1).



**Рис. 4.1**

Статор трехфазной синхронной машины аналогичен статору трехфазного асинхронного двигателя. Он состоит из корпуса 1, цилиндрического сердечника 2, набранного из отдельных пластин электротехнической стали, и трехфазной обмотки 3, уложенной в пазы сердечника.

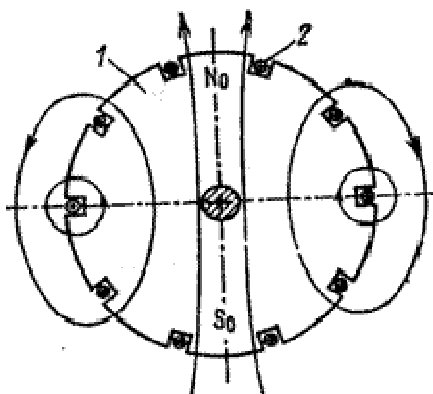
Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит постоянного тока, который создает магнитное поле, вращающееся вместе с ротором. Ротор имеет обмотку возбуждения 4, которая через специальные контактные кольца 5 питается постоянным током от выпрямителя или от небольшого генератора постоянного тока, называемого возбудителем.



**Рис. 4.2**

В отечественной энергетике также используются синхронные машины с «бесщеточным» возбуждением. Обмотка ротора таких машин питается от выпрямителя, вращающегося вместе с ротором. Выпрямитель в свою очередь получает питание от возбудителя, имеющего вращающуюся вместе с ротором трехфазную обмотку, возбуждаемую неподвижными постоянными магнитами.

Роторы синхронных машин бывают двух типов: с явно выраженными и неявно



**Рис. 4.3**

выраженными полюсами.

Роторы с явно выраженными полюсами (рис. 4.1) применяются в сравнительно тихоходных машинах (80 – 1000 об/мин), например гидрогенераторах; они имеют значительное число полюсов. Конструктивно роторы этого типа (рис. 4.2) состоят из вала 6, ступицы 7, полюсов 8, укрепляемых в шлицах ступицы, полюсных катушек 4 возбуждения, размещенных на полюсах. Поверхность полюсного наконечника полюсов имеет такой профиль, что магнитная индукция в воздушном зазоре машины распределяется примерно по синусоидальному закону. Для быстроходных машин (турбогенераторы, синхронные двигатели, турбокомпрессоры и т. п.) явнополюсная конструкция ротора неприменима из-за сравнительно большого диаметра ротора и возникающих в связи с этим недопустимо больших центробежных сил.

Большой механической прочностью обладает ротор с неявно выраженными полюсами. Он состоит (рис. 4.3) из сердечника 1 и обмотки возбуждения 2. Сердечник изготавливается из стальной поковки цилиндрической формы. На его внешней поверхности фрезеруются пазы, в которые закладывается обмотка возбуждения.

Обмотка возбуждения распределяется в пазах сердечника так, чтобы создаваемое ею магнитное поле было распределено в пространстве по закону, близкому к синусоидальному.

**Принцип работы и ЭДС синхронного генератора.** Работа синхронного генератора основана на явлении электромагнитной индукции. При холостом ходе обмотка

якоря (статора) разомкнута, и магнитное поле машины образуется только обмоткой возбуждения ротора (рис. 4.4). При вращении ротора синхронного генератора от проводного двигателя ПД с постоянной частотой  $n_0$  магнитное поле ротора, пересекая проводники фазных обмоток статора AX, BY, CZ (рис.4.4,а) наводит в них ЭДС  $\epsilon = B \cdot l \cdot v$ , где  $B$  – магнитная индукция в воздушном зазоре между статором и ротором;  $l$  – активная длина проводника;  $v$  – линейная скорость пересечения проводников магнитным полем.

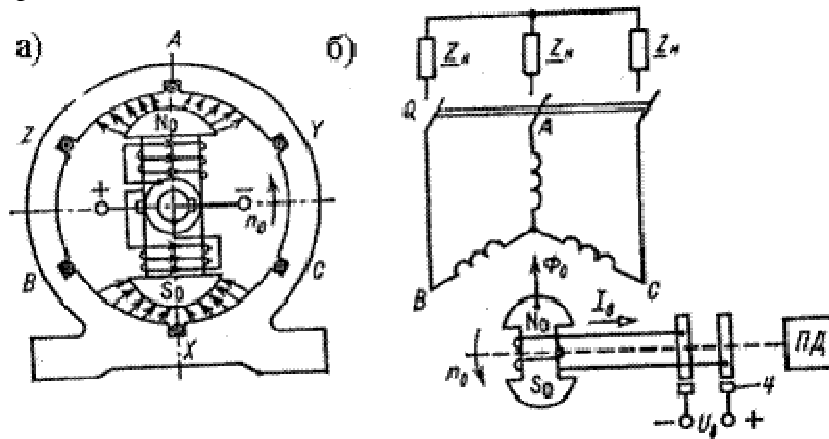


Рис. 4.4

Выше отмечалось, что индукция  $B$  в воздушном зазоре распределена по синусоидальному закону  $B = B_m \cdot \sin(\alpha)$ , где  $\alpha$  – угол, отсчитываемый от нейтральной линии, поэтому ЭДС в одном проводнике  $\epsilon = B \cdot l \cdot v = B_m \cdot l \cdot v \cdot \sin(\alpha) = B_m \cdot l \cdot v \cdot \sin(\omega \cdot t)$ .

Обозначив  $B_m \cdot l \cdot v = E_m$ , получим  $\epsilon = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$ , т.е. ЭДС в проводниках обмоток статора изменяется по синусоидальному закону.

ЭДС отдельных проводников каждой обмотки статора сдвинуты по фазе относительно друг друга, поэтому они суммируются геометрически (аналогично ЭДС статора асинхронного двигателя – см. п. 3.8.1). Действующее значение ЭДС одной фазы определяется выражением:

$$E_0 = 4.44 \cdot k_{об} \cdot f \cdot \omega \cdot \Phi_{от}$$

где  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент;  $f = p \cdot n_0 / 60$  – частота синусоидальных ЭДС;  $\omega$  – число витков одной фазы обмотки статора;  $p$  – число пар полюсов;  $\Phi_{от}$  – максимальный магнитный поток полюса ротора;  $n_0$  – синхронная частота вращения.

Катушки отдельных фаз статора сдвинуты в пространстве на электрический угол, равный  $120^\circ$ , и их ЭДС образуют симметричную трёхфазную систему.

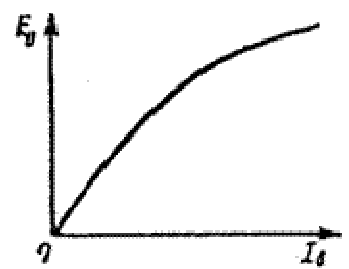


Рис. 4.5

Изменяя ток возбуждения  $I_f$ , можно регулировать магнитный поток ротора  $\Phi_{от}$  и пропорциональную ему ЭДС  $E_0$  генератора. На рис. 4.5 представлена зависимость  $E_0(I_f)$ , снятая при номинальной частоте вращения  $n_{ном} = n_0$ .

Эта зависимость называется характеристикой холостого хода. Форма характеристики напоминает форму кривой намагничивания ферромагнитного сердечника. Характерной особенностью её является отсутствие пропорциональности между магнитным потоком  $\Phi_{от}(ЭДС E_0)$  и током возбуждения  $I_f$ , что обусловлено явлением насыщения магнитной системы машины.

**Принцип действия и вращающий момент синхронного двигателя.** Принцип действия синхронного двигателя основан на явлении притяжения разноименных полюсов двух магнитных полей – статора и ротора. Вращающееся поле статора с полюсами N и S создается при питании обмоток статора от трёхфазной сети аналогично вращающемуся полю асинхронного двигателя (на рис. 4.6 полюсы статора N и S показаны штриховкой, вращаются они против часовой стрелки с частотой  $n_s$ ). Поле ротора создается постоянным током, протекающим по обмотке ротора.

Предположим, что ротор каким-либо способом разогнан до синхронной частоты вращения  $n_0$  против часовой стрелки. Тогда полюсы ротора  $S_0$  и  $N_0$  будут вращаться с частотой  $n_0$ ; произойдет «сцепление» этих полюсов с разноименными полюсами статора  $N$  и  $S$  (см. штрихованные линии на рис. 4.6).

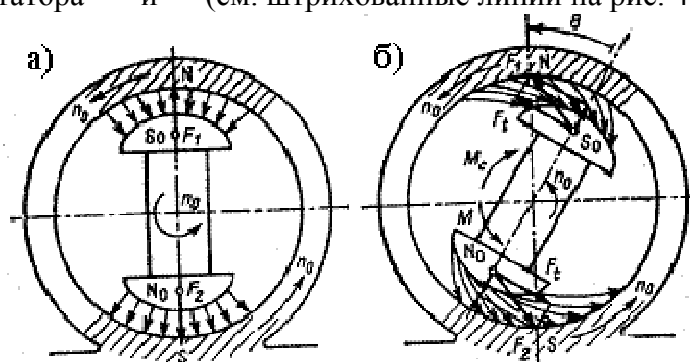


Рис. 4.6

В режиме идеального холостого хода (момент сопротивления  $M_c = 0$ ) оси магнитных полей статора и ротора совпадают (рис. 4.6.а). При этом на полюсы ротора действуют радиальные силы  $F_1$  и  $F_2$ , которые не создают ни вращающего момента, ни момента сопротивления.

Если к валу машины приложить механическую нагрузку, которая создает момент сопротивления  $M_c$ , ось ротора и его полюсов  $S_0$ ,  $N_0$  сместится в сторону отставания на угол  $\theta$  (рис. 4.6,б). Теперь вращающееся поле статора как бы “ведёт” за собой поле ротора и сам ротор. Тангенциальные составляющие  $F_1$  и  $F_2$  создают вращающий момент  $M = 2 \cdot F_t \cdot R$ , где  $R$  - радиус ротора.

Машина работает в двигательном режиме, её вращающий момент  $M = M_c$  преодолевает момент сопротивления механической нагрузки.

При увеличении момента механической нагрузки  $M_c$  на валу ротора угол  $\theta$  увеличивается (до некоторого предела), что приводит к увеличению вращающегося момента двигателя  $M = 2 \cdot F_t \cdot R = 2 \cdot F \cdot R \cdot \sin(\theta)$ , причем частота вращения ротора остается неизменной и равной  $n_0$ .

**Противодействующий момент и противо-ЭДС.** При работе синхронной машины в режиме нагруженного генератора (на схеме рис. 4.4,б нагрузка  $Z_n$  подключена к обмоткам статора через выключатель Q) по обмоткам статора протекает ток, который создает своё вращающееся магнитное поле. В генераторном режиме, в отличие от двигательного режима, полюсы ротора опережают на угол  $\theta$  полюсы магнитного поля статора. В результате взаимодействия разноименных полюсов статора и ротора на ротор действует момент, направленный против вращения, т.е. тормозной момент  $M_r$ . В



установившемся режиме момент  $M_T$  уравнивает вращающийся момент приводного двигателя:  $M_T = M_{м.д.}$ .

При работе синхронной машины в режиме двигателя поле ротора пересекает витки трехфазной обмотки статора и в ней индуцируется ЭДС, которая согласно правилу Ленца действует навстречу току статора. По этой причине её называют противо-ЭДС. В установившемся режиме противо-ЭДС почти полностью уравнивает напряжение сети  $E \approx U_c$ .

Таким образом, при работе синхронной машины на нагрузку (электрическую или механическую) в обмотке статора индуцируется ЭДС  $E$  и возникает момент ротора  $M$ .

**Реакция якоря в синхронной машине.** Реакция якоря – это воздействие поля якоря (статора) на магнитное поле машины. При работе синхронной машины на нагрузку (электрическую в режиме генератора и механическую в режиме двигателя) по обмоткам статора (якоря) протекают синусоидальные токи, которые создают вращающееся магнитное поле статора. Ротор имеет частоту вращения  $n_0$ , поэтому частота ЭДС и тока статора  $f_{cm} = p \cdot n / 60$ , где  $p$  - число пар полюсов машины. Частота вращения магнитного

поля статора  $n_{cm} = 60 \cdot f_{cm} / p = \frac{60}{p} \cdot \frac{p \cdot n_0}{60} = n_0$ . Следовательно, поля ротора и статора вращаются с одной и той же частотой  $n_0$ ; они взаимодействуют между собой и образуют результирующее вращающееся магнитное поле машины. Взаимодействие полей зависит от характера нагрузки и режима работы машины.

Рассмотрим реакцию якоря на примере двухполюсного синхронного генератора с неявно выраженными полюсами ротора, работающего на различную по характеру нагрузку  $R, X_L, X_C$ .

При активной нагрузке с сопротивлением  $R$  ЭДС фазы обмотки статора и её ток совпадают по фазе и достигают максимума в тот момент, когда ось  $mm_1$  магнитного потока ротора  $\Phi_0$  перпендикулярна оси  $nn_1$  катушки обмотки статора (например,  $AX$  на рис. 4.7,а). Магнитный поток статора  $\Phi_{я}$  замыкается по сердечникам статора и ротора через воздушный зазор. Таким образом, в случае активной нагрузки ось потока ротора  $\Phi_0$  опережает ось потока статора  $\Phi_{я}$  на электрический угол, равный  $90^\circ$  (поперечная реакция якоря). При этом результирующий магнитный поток машины  $\Phi_{рез} = \Phi_0 + \Phi_{я}$  (ось  $qq_1$ ) поворачивается относительно потока ротора  $\Phi_0$  на угол  $\theta$  в направлении, противоположном направлению вращению ротора.

При чисто индуктивной нагрузке  $X_L$  ток в обмотке статора отстаёт от ЭДС на  $90^\circ$  и поэтому достигает максимума в тот момент времени, когда полюс ротора  $N_0$  повернётся на  $90^\circ$  по направлению вращения (рис. 4.7,б). В этом случае магнитный поток статора оказывается направленным навстречу магнитному потоку ротора и размагничивает машину ( $\Phi_{рез} = \Phi_0 + \Phi_{я}$ ).

При ёмкостной нагрузке  $X_C$  ток в фазе статора опережает ЭДС на  $90^\circ$  и поэтому достигает максимума в тот момент, когда полюс ротора  $N_0$  не доходит на  $90^\circ$  до оси  $mm_1$  (рис. 4.7,в). Магнитный поток статора в этом случае оказывается направленным согласно с магнитным потоком ротора и намагничивает машину ( $\Phi_{рез} = \Phi_0 + \Phi_{я}$ ).

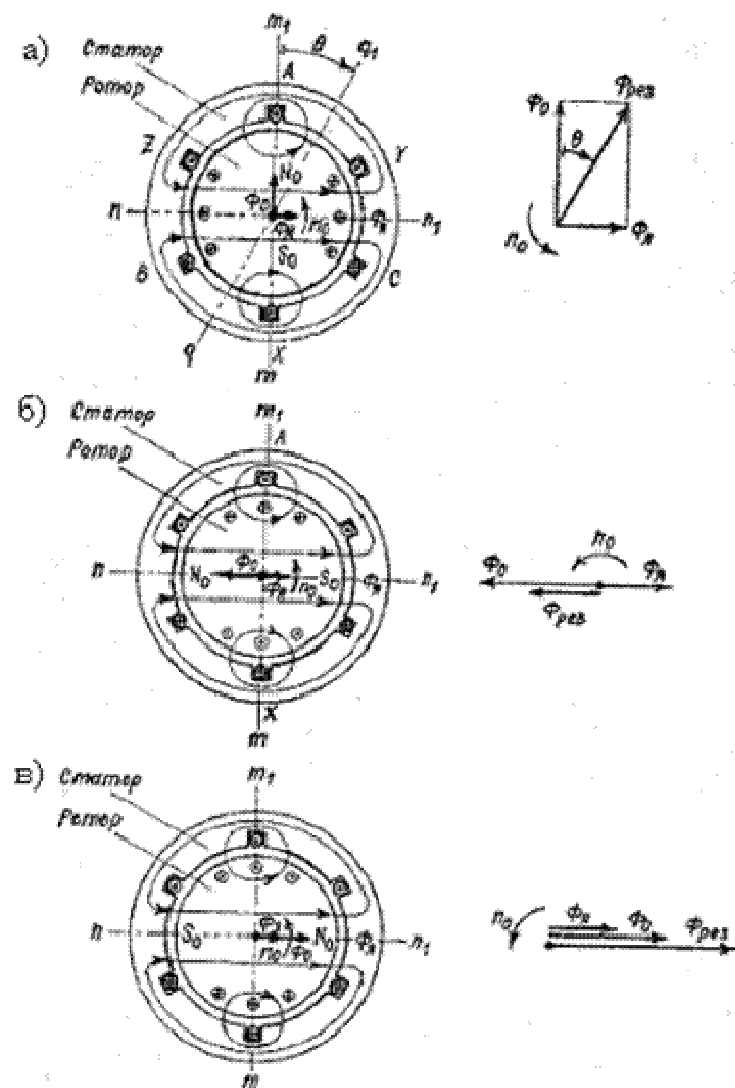


Рис. 4.7

При работе синхронной машины в режиме двигателя ток в статоре при том же направлении вращения имеет противоположное направление. Ось результирующего потока двигателя оказывается повернута относительно потока ротора на угол  $\theta$ , но не против направления вращения, как у генератора, а по направлению вращения.

Таким образом, реакция якоря в синхронной машине изменяет как поток машины, так и его направление (в отличие от асинхронной машины, у которой  $\Phi_{рез} \approx const$ ). Изменение  $\Phi_{рез}$  приводит к изменению ЭДС, что неблагоприятно сказывается на работе потребителей электроэнергии при работе машины в режиме генератора. Уменьшение неблагоприятного влияния реакции якоря достигается уменьшением магнитного потока статора за счёт увеличения воздушного зазора между ротором и статором синхронной машины.

### 3.14 Холостой ход генератора. Работа генератора под нагрузкой.

#### Принцип действия синхронного генератора.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Приводной двигатель развивает момент  $M_{\text{вд}}$ , вращая ротор генератора с частотой  $\omega_0$ . По обмотке ротора протекает постоянный ток  $I_{\text{в}}$ , её МДС  $F_{\text{в}} = I_{\text{в}} \cdot \omega_{\text{в}}$  создает магнитный поток ротора  $\Phi_0$ . Вращаясь вместе с ротором относительно статора, поток  $\Phi_0$  в соответствии с законом электромагнитной индукции (ЭМИ) индуцирует в каждой фазе обмотки статора ЭДС  $E_0$ . При замкнутой внешней цепи по обмоткам статора протекает ток нагрузки  $I$ , который, в свою очередь, образует МДС статора  $F_{\text{ст}}$ . МДС  $F_{\text{ст}}$  создает магнитный поток реакции якоря  $\Phi_{\text{р.я}}$  и поток рассеяния  $\Phi_{\text{д}}$  (аналогичный асинхронному двигателю), который замыкается поперёк пазов статора и вокруг лобовых частей обмотки статора. Поток  $\Phi_{\text{р.я}}$  и  $\Phi_{\text{д}}$  наводят в обмотке статора соответственно ЭДС  $E_{\text{р.я}}$  и  $E_{\text{д}}$ .

Векторная сумма ЭДС  $E = E_0 + E_{\text{р.я}} + E_{\text{д}}$  и падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора  $R_{\text{я}} \cdot I$  равно напряжению на выходах генератора  $U$ .

Магнитные потоки статора  $\Phi_{\text{р.я}}$  и  $\Phi_{\text{д}}$  складываются с магнитным потоком ротора  $\Phi_0$ , который, взаимодействуя с током статора  $I$ , образует тормозной момент  $M_{\text{т}}$  (обратная связь), противодействующий вращающему моменту  $M_{\text{вд}}$  приводного двигателя. Вырабатываемая статором генератора активная мощность  $P$  поступает в электрическую нагрузку.

**Уравнение напряжений обмотки статора.** На рис 4.9 приведена схема замещения одной фазы статора генератора. Составим по этой схеме уравнения второго закона

Кирхгофа:

$$E = E_0 + E_{\text{р.я}} + E_{\text{д}} = U + R_{\text{я}} \cdot I \quad (4.1)$$

Здесь  $E_0$  - ЭДС, индуцируемая магнитным потоком ротора  $\Phi_0$ ;  $E_{\text{р.я}}$  и  $E_{\text{д}}$  - ЭДС, индуцируемая соответственно магнитным потоком реакции якоря и потоком рассеяния;  $R_{\text{я}} \cdot I$  - падение напряжения на активном сопротивлении обмотки статора;  $U$  - фазное напряжение статора генератора.

ЭДС  $E_{\text{р.я}}$  и  $E_{\text{д}}$  наводятся магнитными потоками  $\Phi_{\text{р.я}}$  и  $\Phi_{\text{д}}$ , которые пропорциональны вызывающему их току статора. Поэтому эти ЭДС могут быть выражены через постоянные индуктивные сопротивления  $X_{\text{р.я}}$  и  $X_{\text{д}}$ , т.е.  $E_{\text{р.я}} = -j \cdot X_{\text{р.я}} \cdot I$  и  $E_{\text{д}} = -j \cdot X_{\text{д}} \cdot I$ . Тогда  $E_0 = U + [R_{\text{я}} \cdot I + j \cdot (X_{\text{р.я}} + X_{\text{д}}) \cdot I]$ .

Обозначим сумму внутренних индуктивных сопротивлений машины  $X_{\text{р.я}} + X_{\text{д}} = X_{\text{син}}$ , где  $X_{\text{син}}$  - синхронное сопротивление.

Обычно  $R_{\text{я}} \ll X_{\text{син}}$ , поэтому активным сопротивлением обмотки якоря можно пренебречь. Тогда уравнение (4.1) обмотки статора принимает вид:

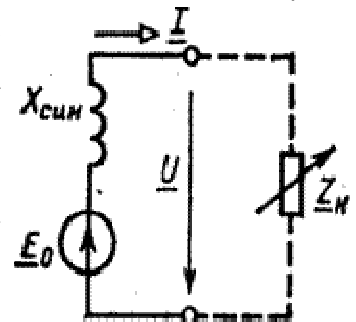


Рис. 4.8

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - j \cdot X_{\text{син}} \cdot \underline{I} \quad (4.2)$$

4.8. Схема замещения генератора, отвечающая уравнению (4.2), изображена на рис.

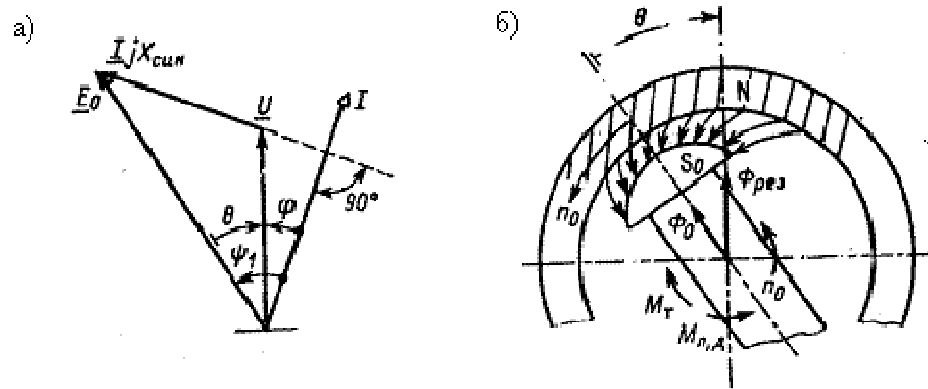


Рис. 4.9

**Векторная диаграмма синхронного генератора.** Векторную диаграмму строят в соответствии с уравнением (4.2). Если нагрузка генератора активно-индуктивная, то вектор тока статора  $\underline{I}$  отстает по фазе на угол  $\varphi$  от вектора напряжения  $\underline{U}$ , а вектор индуктивного падения напряжения  $j \cdot X_{\text{син}} \cdot \underline{I}$  опережает вектор тока на угол  $90^\circ$  (рис. 4.10,а). Сумма векторов  $\underline{U}$  и  $j \cdot X_{\text{син}} \cdot \underline{I}$  дает вектор ЭДС  $\underline{E}_0$ . Угол  $\theta$  между векторами  $\underline{E}_0$  и  $\underline{U}$  называют углом нагрузки, а угол между векторами  $\underline{E}_0$  и  $\underline{I}$  обозначается  $\psi_1$ . ЭДС  $\underline{E}_0$  соответствует магнитный поток ротора  $\Phi_0$ , а напряжению  $\underline{U}$  – результирующий магнитный поток машины  $\Phi_{\text{рез}}$  (рис. 4.9,б). В генераторном режиме поток  $\Phi_0$  опережает поток  $\Phi_{\text{рез}}$  на угол  $\theta$ , чему соответствует сдвиг на тот же угол полюса ротора  $S_0$  относительно полюса N и результирующего поля машины. Силовые линии магнитного поля между полюсами показаны тонкими сплошными линиями. В генераторном режиме в результате взаимодействия полюсов  $S_0$  и N образуется противодействующий момент  $M_{\text{пр}}$ .

**Работа синхронного генератора на автономную нагрузку.** Синхронные генераторы работают в автономном режиме (рис. 4.4, б) в тех случаях, когда промышленная электрическая сеть имеет недостаточную мощность или вообще отсутствует, например, на удалённых строительных площадках, нефтяных и газовых промыслах, лесозаготовительных пунктах, морских и речных судах, летательных аппаратах и т.п. Напряжение на выводах автономно работающего синхронного генератора  $\underline{U}$  в большой степени зависит от нагрузки и её характера.

Зависимость  $U(I)$  при  $n_0 = \text{const}$ ,  $I_b = \text{const}$  и  $\cos \varphi = \text{const}$  называется внешней характеристикой генератора. Семейство внешних характеристик синхронного генератора при различных  $\cos \varphi$  изображено на рис. 4.10. Характеристики показывают, что напряжение генератора при активно – индуктивной нагрузке ( $\varphi > 0$ ) довольно резко падает, что объясняется размагничивающим действием реакции якоря, а при активно – ёмкостной нагрузке ( $\varphi < 0$ ) изменяется незначительно и даже может увеличиваться, что связано с намагничивающим действием реакции якоря при этой нагрузке. При эксплуатации генератора стабилизацию напряжения осуществляют регуляторами возбуждения, которые при увеличении тока нагрузки  $I$  увеличивают поток ротора  $\Phi_0$ , а следовательно, и ЭДС  $E_0$  за счёт увеличения тока  $I_b$  возбуждения ротора.

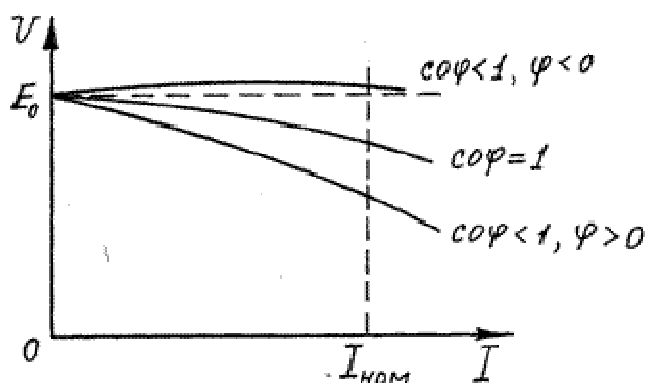


Рис. 4.10

**Работа синхронного генератора параллельно с трёхфазной сетью большой мощности на общую нагрузку.** На электростанциях обычно устанавливают несколько синхронных генераторов, параллельно работающих на общую электрическую сеть, а отдельные электрические станции объединяются в мощные энергосистемы (например, единая

система европейской части РФ), которые обслуживают промышленных, коммунальных и бытовых потребителей.

При совместной работе синхронного генератора с сетью существенное значение имеют вопросы включения на параллельную работу, регулирования реактивной и активной мощностей генератора. При анализе параллельной работы принимается, что напряжение  $U_c$  и частота сети постоянны. Рассмотрим включение генератора на параллельную работу с сетью.

В момент включения генератора в сеть возможен толчок тока, который может вызвать ударные электромагнитные силы и моменты, способные нарушить работу электрической сети, вызвать механические повреждения генератора и другого электрооборудования. Для того чтобы избежать этих опасных явлений, необходимо, чтобы ток генератора в момент включения был равен нулю. Это условие выполняется,

если напряжение генератора равно напряжению сети  $\vec{U} = \vec{U}_c$  во всех трёх фазах. Это общее условие распадается на четыре частных условия:

Ø действующие значения фазных напряжений включаемого генератора должны быть равны действующим значениям фазных напряжений сети:  $U_1 = U_2 = U_3 = U_c = U_{cc}$  (равенство напряжений по модулю);

Ø напряжения генератора и сети должны совпадать по фазе;

Ø частота напряжений генератора  $f$  должна быть равна частоте сети  $f_c$ ;

Ø порядок чередования фаз генератора и сети должен быть одинаковым.

Правильное соотношение между напряжениями трёхфазного генератора и трёхфазной сети иллюстрируется векторной диаграммой на рис. 4.11.

Процесс выполнения перечисленных условий при включении на параллельную работу называется синхронизацией.

Синхронизацию можно осуществить, используя вольтметр и лампы Н1 – Н3, включённые по схеме рис. 4.11. Равенство частот и фаз достигается изменением частоты вращения ротора, т.е. регулировкой частоты вращения приводного двигателя ПД.

Равенство действующих значений (модулей) напряжений  $\vec{U}$  и  $\vec{U}_c$  достигается

регулированием тока возбуждения  $I_b$  генератора. Правильность чередования фаз обеспечивается присоединением фазных обмоток подключаемого генератора к одноимённым фазам сети с тем, чтобы было соблюдено одинаковое чередование фаз: А, В и С. При выполнении условий синхронизации лампы гаснут, а стрелка вольтметра показывает нуль. В этот момент времени обмотки статора присоединяют к сети. Для включения на параллельную работу генераторов большой мощности применяются специальные схемы и устройства автоматической синхронизации.

Регулирование реактивной мощности синхронного генератора возможно изменением тока возбуждения  $I_b$ . После включения генератора на параллельную работу ток  $\vec{i}$  в обмотке статора равен нулю (рис. 4.12, а). При этом, как видно из (4.2),  $\vec{U} = \vec{E}_0$  и напряжение генератора равно напряжению сети, т.е.  $\vec{U} = \vec{U}_c$ .

В этих условиях синхронная машина работает в режиме идеального холостого хода, она не отдаёт мощность в сеть и не потребляет её из сети.

Если после включения генератора на параллельную работу изменить ток возбуждения  $I_b$ , то изменятся магнитный поток ротора  $\Phi_0$  и ЭДС  $E_0$ , а между сетью и статором появится уравнивающий ток  $\vec{i}$ . Значения этого тока определим из (4.2) с учётом того, что  $\vec{U} = \vec{U}_c$ :

$$\vec{i} = (\vec{E}_0 - \vec{U}_c) / jX_{\text{син}} \quad (4.3)$$

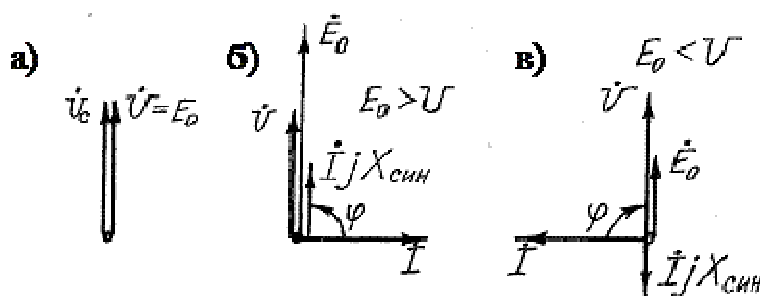


Рис. 4.12

При работе генератора на сеть большой мощности его напряжение остаётся неизменным и равным напряжению сети, что обуславливает и постоянство результирующего магнитного потока генератора. При увеличении тока возбуждения (перевозбуждение генератора)  $E_0 > U$ .

С учетом (4.3) вектор произведения  $\vec{i} \times X_{\text{син}}$  направлен согласно с вектором напряжения  $\vec{U}$  (рис. 4.12, б), а уравнивающий ток  $\vec{i}$  отстаёт по фазе на  $90^\circ$  от вектора  $\vec{U}$ , т.е.  $\vec{i}$  является индуктивным током. В результате действия реакции якоря индуктивный

ток  $\dot{I}$  размагничивает машину и сохраняет неизменным результирующий магнитный поток. Генератор отдаёт в сеть реактивную мощность  $Q_L$ , которая может быть использована другими приёмниками, включёнными в сеть. С точки зрения воздействия на сеть генерирование реактивной мощности равносильно потреблению из сети ёмкостного тока, т.е. перевозбуждённый синхронный генератор подобен конденсатору.

Напротив, если ток возбуждения уменьшать (недовозбуждение генератора), ток  $\dot{I}$  будет опережать по фазе напряжение  $\dot{U}$  на  $90^\circ$  (рис. 4.13, в). Опережающий

ток  $\dot{I}$  окажет на магнитную систему генератора намагничивающее действие. Изменение фазы тока на  $180^\circ$  по сравнению с предыдущим случаем означает, что генератор теперь потребляет из сети реактивную мощность, т.е. его влияние на сеть подобно действию индуктивности.

В обоих случаях угол сдвига  $\psi$  между током  $\dot{I}$  и ЭДС  $\dot{E}_0$  равен  $90^\circ$ , поэтому активная мощность  $P = 3E_0 I \cos \psi = 0$ . Таким образом, изменением тока возбуждения можно регулировать только реактивную мощность синхронного генератора, но нельзя нагрузить его активной мощностью.

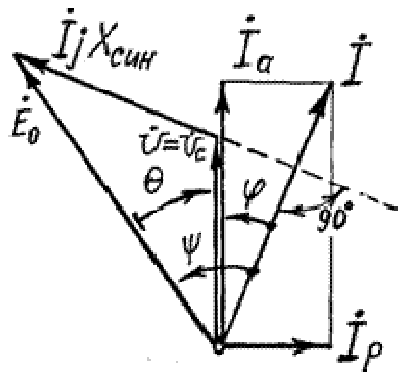


Рис. 4.13

Активную мощность генератор отдаёт в том случае, когда, начиная от холостого хода, увеличивается вращающий момент его приводного двигателя, что достигается увеличением потребляемого им энергоносителя (воды, пара, нефти, угля и т.п.). Под действием момента приводного двигателя ось полюсов ротора опережает ось полюсов вращающегося магнитного поля на угол  $\theta < 0$  (см. полюсы  $S_0$  и  $N$  на рис. 4.9, б). В результате вектор ЭДС  $\dot{E}_0$  на векторной диаграмме рис. 4.12, б станет двигаться по направлению вращения и займёт положение, показанное на векторной диаграмме рис. 4.13.

Вектор  $\dot{E}_0$  опережает вектор напряжения сети на угол  $\theta$ , а у тока статора  $\dot{I}$  появится активная составляющая  $\dot{I}_a$ , которая указывает, что генератор отдаёт в сеть активную мощность. Её сумма с мощностью потерь в генераторе равна механической мощности, поступающей от приводного двигателя. Одновременно с отдачей в сеть активной мощности генератор развивает противодействующий момент  $M_{пр}$ , который уравнивает возросший вращающий момент приводного двигателя. Противодействующий момент генератора обусловливается взаимодействием активной составляющей тока  $\dot{I}_a$  с результирующим магнитным потоком машины  $\Phi_{рез}$ .

### 3.15 Уравнение ЭДС и напряжений синхронного генератора. Индуктивные сопротивления синхронных машин. Векторные диаграммы синхронного генератора. Характеристики синхронного генератора и определение его параметров.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

**Холостой ход.** Э. д. с, индуцированная в каждой фазе обмотки якоря синхронного генератора, при холостом ходе

$$E_0 = c_E \Phi_{\text{в}} n \quad (88)$$

где

$c_E$  — постоянная величина, зависящая от конструкции машины (числа витков обмотки якоря, числа полюсов и др.);

$\Phi_{\text{в}}$  — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения.

**Регулирование напряжения и частоты.** Из формулы (88) следует, что регулировать э. д. с. (напряжение генератора) можно двумя способами: изменением частоты вращения  $n$  или изменением магнитного потока возбуждения  $\Phi_{\text{в}}$ . Для изменения потока возбуждения в цепь обмотки возбуждения включают регулировочный реостат (см. рис. 284) или автоматически действующий регулятор напряжения, которые позволяют изменить ток возбуждения, поступающий в эту обмотку, а следовательно, и создаваемый ею поток. Регуляторы напряжения широко применяют для регулирования возбуждения генераторов, работающих при переменной частоте вращения, т. е. генераторов, приводимых во вращение от дизеля (на тепловозах) или от колесной пары (на пассажирских вагонах). При изменении частоты вращения  $n$  и нагрузки машины они автоматически изменяют ток возбуждения  $I_{\text{в}}$ , т. е. поток  $\Phi_{\text{в}}$ , так, чтобы напряжение генератора было стабильным или изменялось по заданному закону.

Регулирование частоты  $f_1$ , как следует из формулы (86), осуществляется изменением частоты вращения ротора.

**Работа машины при нагрузке.** При увеличении нагрузки синхронного генератора напряжение его изменяется. Это изменение происходит по двум причинам. При протекании тока нагрузки по обмотке якоря создается так же, как и в асинхронной машине, вращающееся магнитное поле, т. е. свой магнитный поток якоря  $\Phi_{\text{я}}$ . Поток якоря  $\Phi_{\text{я}}$  и поток возбуждения  $\Phi_{\text{в}}$  вращаются с одинаковой частотой и создают, следовательно, некоторый результирующий поток  $\Phi_{\text{рез}} = \Phi_{\text{я}} + \Phi_{\text{в}}$ . В результате э. д. с. машины  $E = c_E \Phi_{\text{рез}} n$ , т. е. будет отличаться от э. д. с.  $E_0$  при холостом ходе.

Воздействие потока якоря на результирующий поток синхронной машины называется реакцией якоря. Так как под действием реакции якоря изменяется результирующий поток в машине, то и напряжение генератора будет зависеть от тока, проходящего по обмотке якоря, и его сдвига фаз относительно напряжения. Когда ток в обмотке якоря совпадает по фазе с э. д. с. холостого хода  $E_0$  (рис. 288, а), поток  $\Phi_{\text{я}}$  действует по поперечной оси машины  $q - q$ ; он размагничивает одну половину каждого полюса и подмагничивает другую. Результирующий поток  $\Phi_{\text{рез}}$  в этом случае из-за насыщения магнитной цепи машины несколько уменьшается по сравнению с  $\Phi_{\text{в}}$ .

В случае когда ток в обмотке якоря отстает от  $E_0$  на  $90^\circ$  (рис. 288, б), поток якоря  $\Phi_{\text{я}}$  действует по продольной оси машины против  $\Phi_{\text{в}}$ , т. е. уменьшает результирующий поток (размагничивает машину); если ток в обмотке якоря опережает  $E_0$  на  $90^\circ$  (рис. 288, в), поток  $\Phi_{\text{я}}$  совпадает по направлению с  $\Phi_{\text{в}}$ , т. е. увеличивает поток  $\Phi_{\text{рез}}$  (подмагничивает машину). Если ток якоря отстает или опережает э. д. с.  $E_0$  на угол, меньший  $90^\circ$ , то это можно рассматривать как сочетание рассмотренных случаев. В общем случае если ток якоря отстает от напряжения, то реакция якоря действует размагничивающим образом. Она уменьшает результирующий поток и напряжение генератора. Когда ток опережает напряжение, то реакция якоря увеличивает результирующий поток и напряжение генератора.

Второй причиной изменения напряжения генератора при его нагрузке являются внутренние падения напряжения в обмотке



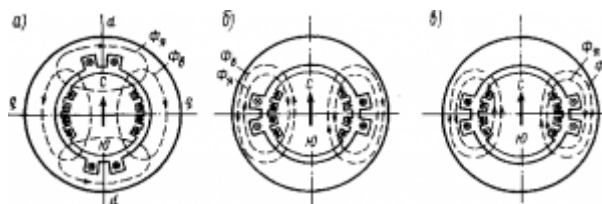


Рис. 288. Реакция якоря синхронной машины при различном характере нагрузки якоря — активное и реактивное. Эти падения напряжения возникают в синхронной машине по тем же причинам, что и в асинхронном двигателе и трансформаторе.

Внешние характеристики синхронного генератора (рис. 289) представляют собой зависимости изменения напряжения генератора  $U$  от тока нагрузки  $I_a$  при постоянных значениях  $t$ ,  $I_b$  и  $\cos \varphi$ . Коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , при котором работает генератор, определяется характером его нагрузки (соотношением между активным и реактивным сопротивлениями потребителей). При активной нагрузке напряжение генератора с ростом тока нагрузки уменьшается по кривой 2, а при активно-индуктивной — по кривой 1; чем больше угол сдвига фаз  $\varphi$  между током  $I_a$  и напряжением  $U$ , тем сильнее размагничивающее действие реакции якоря и тем ниже идет кривая напряжения. При активно-емкостной нагрузке, когда ток  $I_a$  опережает по фазе напряжение  $U$ , реакция якоря подмагничивает машину и напряжение  $U$  может даже возрасти по сравнению с  $U_0 = E_0$  при холостом ходе (кривая 3).

В синхронных генераторах из-за значительной реакции якоря изменение напряжения во много раз больше, чем в трансформаторах. Обычно генераторы работают при  $\cos \varphi = 0,85-0,9$  при отстающем токе, при этом  $\Delta U = 35-25\%$  от  $U_{ном}$ . При столь большом изменении напряжения для нормальной работы подключенных к генератору потребителей требуется применять специальные устройства для стабилизации его выходного напряжения, например быстродействующие регуляторы возбуждения.

Отдаваемая генератором мощность при одних и тех же значениях тока зависит от коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , при котором работает генератор, т. е. от характера его нагрузки. Однако проводники генератора рассчитываются на определенный ток, а его изоляция и магнитная система — на определенное напряжение и магнитный поток независимо от  $\cos \varphi$  нагрузки. По этой причине номинальной мощностью генератора считается его полная мощность  $S$  в киловольт-амперах (кВ\*А), на которую рассчитана машина по условиям нагревания и длительной безаварийной работы. Регулировать активную мощность синхронного генератора при работе его на какую-либо нагрузку можно путем изменения сопротивления нагрузки или напряжения машины.

При передаче энергии от вала ротора синхронного генератора в обмотку статора в различных элементах машины возникают потери мощности (рис. 290). Потери имеют место в обмотках статора и ротора — электрические потери  $P_{эл}$ , в стали их сердечников — магнитные потери  $P_m$  и в трущихся элементах (подшипники, вентиляторы и пр.) — механические потери  $P_{мх}$ . К. п. д. синхронных машин находится в пределах от 0,85 до 0,95, т. е. имеет примерно те же значения, как и у асинхронных машин.

**Короткое замыкание.** При коротком замыкании синхронного генератора ток короткого замыкания  $I_k$  ограничивается внутренним сопротивлением обмотки якоря, которое имеет в основном индуктивный характер. Поэтому ток  $I_k$  отстает от напряжения

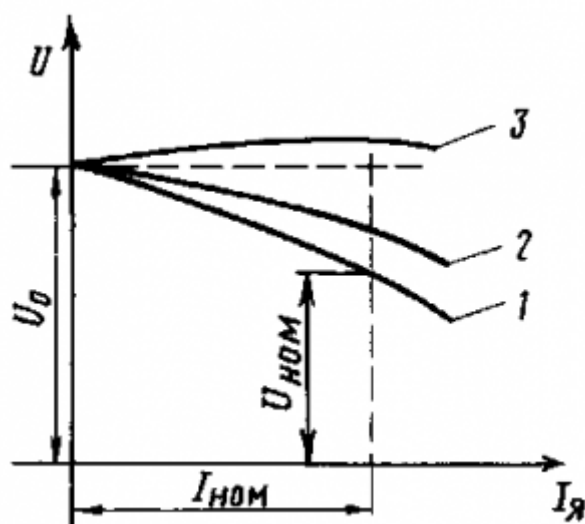


Рис. 289. Внешние характеристики синхронного генератора при различной нагрузке

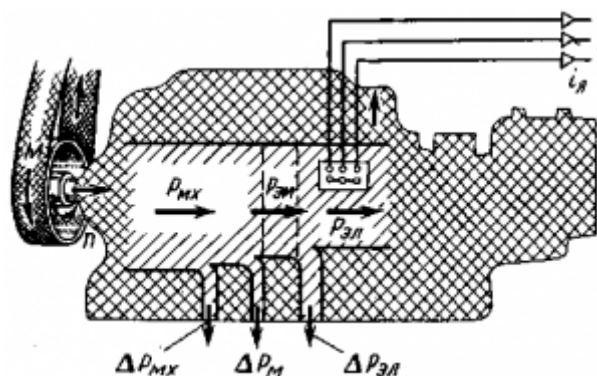


Рис. 290. Энергетическая диаграмма синхронного генератора

на угол, близкий к  $90^\circ$ , и реакция якоря сильно размагничивает машину и резко уменьшает поток  $\Phi_{рез}$  и э. д. с. генератора  $E$ . В результате установившийся ток короткого замыкания в синхронных машинах сравнительно невелик (в некоторых машинах он меньше номинального), но из этого нельзя делать вывод, что короткое замыкание не опасно для генератора.

При внезапном коротком замыкании и уменьшении результирующего потока машины  $\Phi_{рез}$  в обмотках возбуждения и демпферной индуцируются э. д. с. и возникают токи, которые согласно правилу Ленца препятствуют изменению потока  $\Phi_{рез}$ . Поэтому этот поток и э. д. с. генератора уменьшаются сравнительно медленно, хотя машина уже замкнута накоротко. В результате ток в обмотке якоря в начальный момент короткого замыкания резко возрастает, а затем постепенно уменьшается. Наибольший ток  $I_k$  в начальный момент короткого замыкания называется ударным; он может превышать амплитуду номинального тока якоря в 10—15 раз.

Для ограничения ударного тока в цепь обмотки якоря иногда вводят дополнительную индуктивность (реактор).

### 3.16 Особенности работы генератора на сеть большой мощности. Регулирование активной мощности. Регулирование реактивной мощности.

#### Особенности работы генератора на сеть большой мощности.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Обычно на электростанциях устанавливают несколько синхронных генераторов для параллельной работы на общую электрическую сеть. Это обеспечивает увеличение общей мощности электростанции (при ограниченной мощности каждого из установленных на ней генераторов), повышает надежность энергоснабжения потребителей и позволяет лучше организовать обслуживание агрегатов. Электрические станции, в свою очередь, объединяют для параллельной работы в мощные энергосистемы, позволяющие наилучшим образом решать задачу производства и распределения электрической энергии. Таким образом, для синхронной машины, установленной на электрической станции или на каком-либо объекте, подключенном к энергосистеме, типичным является режим работы на сеть большой мощности, по сравнению с которой собственная мощность генератора является очень малой. В этом случае с большой степенью точности можно принять, что генератор работает параллельно с сетью бесконечно большой мощности т. е. что *напряжение сети  $U_c$  и ее частота  $f_c$  являются постоянными, не зависящими от нагрузки данного генератора.*

**Включение генератора на параллельную работу с сетью.** В рассматриваемом режиме необходимо обеспечить возможно меньший бросок тока в момент присоединения генератора к сети. В противном случае возможны срабатывание защиты поломка генератора или первичного двигателя.

Ток в момент подключения генератора к сети будет равен нулю, если удастся обеспечить равенство мгновенных значений напряжений сети  $u_c$  и генератора  $u_g$  :

(6.27)

$$U_{cm} \sin(\omega c t - \alpha c) = U_{gm} \sin(\omega g t - \alpha g).$$

На практике выполнение условия (6.27) сводится к выполнению трех равенств: значений напряжений сети и генератора  $U_{cm} = U_{gm}$  или  $U_c = U_g$  ; частот  $\omega c = \omega g$  или  $f_c = f_g$  ; их начальных фаз  $\alpha c = \alpha g$  (совпадение по фазе векторов  $\vec{U}_c$  и  $\vec{U}_g$ ). Кроме того, для трехфазных генераторов нужно согласовать порядок чередования фаз.

Совокупность операций, проводимых при подключении генератора к сети, называют синхронизацией. Практически при синхронизации генератора сначала устанавливают номинальную частоту вращения ротора, что обеспечивает приближенное равенство частот  $f_c \approx f_g$  а затем, регулируя ток возбуждения, добиваются равенства напряжения  $U_c = U_g$  . Совпадение по фазе векторов напряжений сети и генератора ( $\alpha c = \alpha g$ ) контролируется специальными приборами — *ламповым и стрелочными синхроскопами.*

Ламповые синхроскопы применяют для синхронизации генераторов малой мощности, поэтому обычно их используют в лабораторной практике. Этот прибор представляет собой три лампы, включенные между фазами генератора и сети (рис. 6.32, а). На каждую лампу действует напряжение  $\Delta u = u_c - u_g$  , которое при  $f_c \neq f_g$  изменяется с частотой  $\Delta f = f_c - f_g$  , называемой *частотой биений* (рис. 6.32,б). В этом случае лампы мигают. При  $f_c \approx f_g$  разность  $\Delta u$  изменяется медленно, вследствие чего лампы постепенно загораются и погасают.

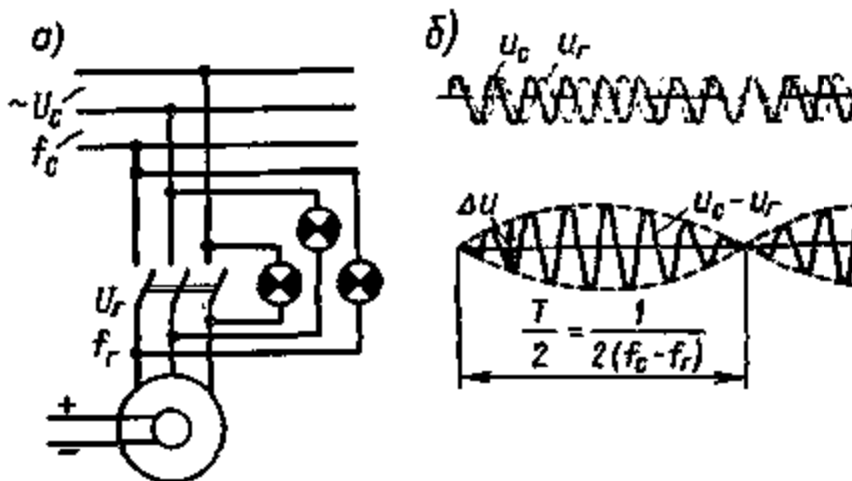


Рис. 6.32.

Схема подключения синхронного генератора к сети с помощью лампового синхроскопа (а) и кривые изменения напряжений  $u_c$  и  $u_r$  перед включением генератора (б)

Обычно генератор подключают к сети в тот момент, когда разность напряжений  $\Delta u$  на короткое время становится близкой нулю, т. е. в середине периода погасания ламп. В этом случае выполняется условие совпадения по фазе векторов  $\vec{U}_c$  и  $\vec{U}_r$ . Для более точного определения этого момента часто применяют нулевой вольтметр, имеющий растянутую шкалу в области нуля. После включения генератора в сеть дальнейшая синхронизация частоты его вращения, т. е. обеспечение условия  $n_2 = n_1$ , происходит автоматически.

Генераторы большой мощности синхронизируют с помощью стрелочных синхроскопов, работающих по принципу вращающегося магнитного поля. В этих приборах при  $f_c \neq f_r$  стрелка вращается с частотой, пропорциональной разности частот  $f_c - f_r$ , в одну или другую сторону в зависимости от того, какая из этих частот больше. При  $f_c = f_r$  стрелка устанавливается на нуль; в этот момент и следует подключать генератор к сети. На электрических станциях обычно используют автоматические приборы для синхронизации генераторов без участия обслуживающего персонала.

Довольно часто применяют метод самосинхронизации, при котором генератор подключают к сети при отсутствии возбуждения (обмотка возбуждения замыкается на активное сопротивление). При этом ротор разгоняют до частоты вращения, близкой к синхронной (допускается скольжение до 2%), за счет вращающего момента первичного двигателя и асинхронного момента, обусловленного индуцированием тока

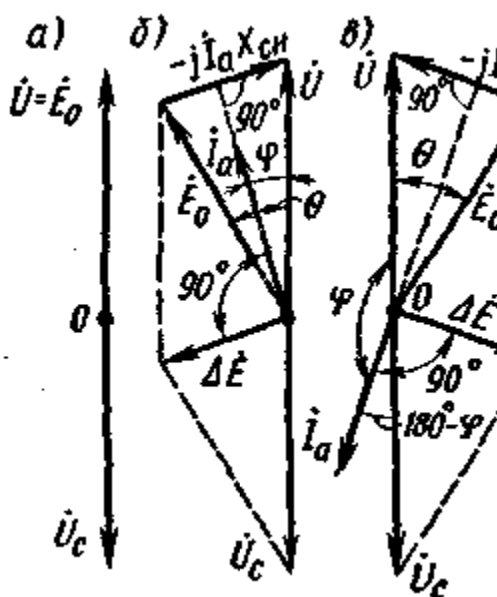


Рис. 6.33. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного генератора при параллельной работе с сетью

в демпферной обмотке. После этого в обмотку возбуждения подают постоянный ток, что приводит к втягиванию ротора в синхронизм. При методе самосинхронизации в момент включения генератора возникает сравнительно большой бросок тока, который не должен превышать  $3,5I_a$  ном.

**Регулирование активной мощности.** После включения генератора в сеть его напряжение  $U$  становится равным напряжению сети  $U_c$ . Относительно внешней нагрузки напряжения  $U$  и  $U_c$  совпадают по фазе, а по контуру «генератор — сеть» находятся в противофазе, т. е.  $\dot{U} = -\dot{U}_c$  (рис. 6.33, а). При точном выполнении указанных трех условий, необходимых для синхронизации генератора, его ток  $I_a$  после подключения машины к сети равняется нулю. Рассмотрим, какими способами можно регулировать ток  $I_a$  при работе генератора параллельно с сетью на примере неявнополюсного генератора.

Ток, проходящий по обмотке якоря неявнополюсного генератора, можно определить из уравнения (6.23)

(6.28)

$$\dot{I}_a = (\dot{E}_0 - \dot{U}) / (jX_{сн}) = -j(\dot{E}_0 - \dot{U}) / X_{сн}.$$

Так как  $U = U_c = \text{const}$ , то силу тока  $I_a$  можно изменять только двумя способами — изменяя ЭДС  $E_0$  по величине или по фазе. Если к валу генератора приложить внешний момент, больший момента, необходимого для компенсации магнитных потерь мощности в стали и механических потерь, то ротор приобретает ускорение, вследствие чего вектор  $\dot{E}_0$  смещается относительно вектора  $\dot{U}$  на некоторый угол  $\theta$  в направлении вращения векторов (рис. 6.33, б). При этом возникает некоторая небалансная ЭДС  $\Delta E$ , приводящая согласно (6.28) к появлению тока  $I_a$ . Возникающую небалансную ЭДС  $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 - \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{U}_c = j\dot{I}_a X_{сн}$  можно показать на векторной диаграмме (рис. 6.33, б). Вектор тока  $I_a$  отстает от вектора  $\Delta E$  на  $90^\circ$ , поскольку его величина и направление определяются индуктивным сопротивлением  $X_{сн}$ .

При работе в рассматриваемом режиме генератор отдает в сеть активную мощность

$P = mUI_a \cos \varphi$  и на вал его действует электромагнитный тормозной момент, который уравнивает вращающий момент первичного двигателя, вследствие чего частота вращения ротора остается неизменной. Чем больше внешний момент, приложенный к валу генератора, тем больше угол  $\theta$ , а следовательно, ток и мощность, отдаваемые генератором в сеть.

Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор  $\dot{E}_0$  будет отставать от вектора напряжения  $\dot{U}$  на угол  $\theta$  (рис. 6.33, в). При этом возникают небалансная ЭДС  $\Delta \dot{E}$  и ток  $\dot{I}_a$ , вектор которого отстает от вектора  $\Delta \dot{E}$  на  $90^\circ$ . Так как угол  $\varphi > 90^\circ$ , активная составляющая тока находится в противофазе с напряжением генератора. Следовательно, в рассматриваемом режиме активная мощность  $P = mUI_a \cos \varphi$  забирается из сети, и машина работает двигателем, создавая электромагнитный вращающий момент, который уравнивает внешний тормозной момент; частота вращения ротора при этом снова остается неизменной.

Таким образом, для увеличения нагрузки генератора необходимо увеличивать приложенный к его валу внешний момент (т. е. вращающий момент первичного двигателя), а для уменьшения нагрузки — уменьшать этот момент. При изменении

направления внешнего момента (если вал ротора не вращать, а тормозить) машина автоматически переходит из генераторного в двигательный режим.

**Регулирование реактивной мощности.** Если в машине, подключенной к сети и работающей в режиме холостого хода (рис. 6.34, а), увеличить ток возбуждения  $I_b$ , то возрастет ЭДС  $E_0$  (рис. 6.34, б), возникнет небалансная ЭДС  $\Delta \dot{E} = -jI_a X_{CH}$  и по обмотке якоря будет проходить ток  $I_a$ , который согласно (6.28) определяется только индуктивным сопротивлением  $X_{CH}$  машины. Следовательно, ток  $I_a$  реактивный: он отстает по фазе от напряжения  $\dot{U}$  на угол  $90^\circ$  или опережает на тот же угол напряжение сети  $\dot{U}_C$ . При уменьшении тока возбуждения ток  $I_a$  изменяет свое направление: он опережает на  $90^\circ$  напряжение  $\dot{U}$  (рис. 6.34, в) и отстает на  $90^\circ$  от напряжения  $\dot{U}_C$ . Таким образом, при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока  $I_a$ , т. е. реактивная мощность машины  $Q$ . Активная составляющая тока  $I_a$  в рассматриваемых случаях равна нулю. Следовательно, активная мощность  $P = 0$ , и машина работает в режиме холостого хода.

При работе машины под нагрузкой создаются те же условия: при изменении тока возбуждения изменяется лишь реактивная составляющая тока  $I_a$ , т. е. реактивная мощность машины  $Q$ . Режим возбуждения синхронной машины с током  $I_{b.п}$ , при

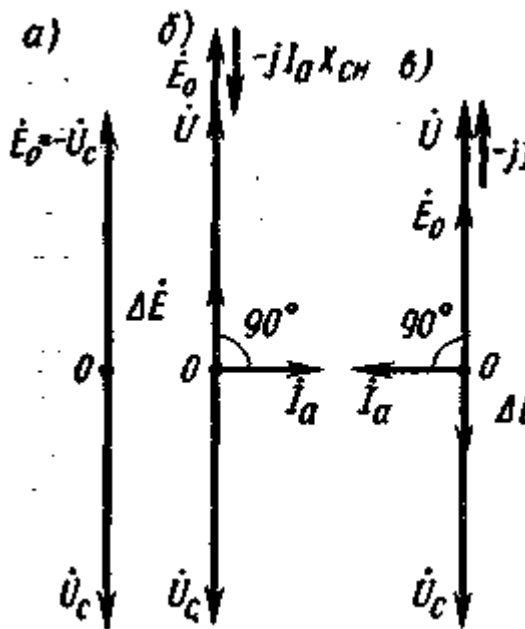


Рис. 6.34. Упрощенные векторные диаграммы неявнополусного синхронного генератора при параллельной работе с сетью и отсутствии активной нагрузки

котором реактивная составляющая тока  $I_a$  равна нулю, называют режимом полного или нормального возбуждения. Если ток возбуждения  $I_b$  больше тока  $I_{b.п}$ , при котором имеется режим полного возбуждения, то ток  $I_a$  содержит отстающую от  $U$  реактивную составляющую, что соответствует активно-индуктивной нагрузке генератора. Такой режим называют режимом перевозбуждения. Если ток возбуждения  $I_b$  меньше тока  $I_{b.п}$ , то ток  $I_a$  содержит реактивную составляющую, опережающую напряжение  $U$ , что соответствует активно-емкостной нагрузке генератора. Такой режим называют режимом недовозбуждения.

Перевозбужденная синхронная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна емкости. Машину, специально предназначенную для

работы в таком режиме, называют синхронным компенсатором и используют для повышения коэффициента мощности электрических установок и стабилизации напряжения в электрических сетях. Недовозбужденная синхронная машина, работающая в режиме холостого хода, относительно сети эквивалентна индуктивности.

Возникновение реактивной составляющей тока  $I_a$  физически объясняется тем, что при работе синхронной машины на сеть бесконечно большой мощности суммарный магнитный поток сцепленный с каждой из фаз,  $\Sigma\Phi = \Phi_{рез} + \Phi\sigma = \Phi_b + \Phi_a + \Phi\sigma$  не зависит от тока возбуждения и при всех условиях остается неизменным, так как

(6.29)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a + \dot{E}\sigma_a = - \dot{U}_c = const.$$

Следовательно, если ток возбуждения  $I_b$  больше тока, требуемого для полного возбуждения, то возникает отстающая составляющая тока  $I_a$ , которая создает размагничивающий поток реакции якоря  $\Phi_a$ ; если ток  $I_b$  меньше тока, необходимого для полного возбуждения, то возникает опережающая составляющая тока  $I_a$ , которая создает подмагничивающий поток реакции якоря  $\Phi_a$ . Во всех случаях суммарный поток машины  $\Sigma\Phi$  автоматически поддерживается неизменным.

## 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАНЯТИЯМ

### 4.1 Лабораторная работа №1 (ЛР-1) Генератор постоянного тока.

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Генераторы постоянного тока используются в качестве источников электрической энергии. При работе генератора его якорь приводится во вращение приводным двигателем. На его обмотку возбуждения подаётся постоянный ток для создания основного магнитного потока  $\Phi$ . В результате, в обмотке якоря генератора индуцируется ЭДС  $E = C\Phi\omega$ , где  $C$  - конструктивный коэффициент машины, и к его выводам может быть подключён потребитель электрической энергии.

В генераторах с самовозбуждением питание обмотки возбуждения осуществляется с выводов цепи якоря генератора. В зависимости от схемы подключения обмотки возбуждения различают генераторы с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. У генераторов с параллельным возбуждением обмотку возбуждения подключают параллельно якорю и нагрузке; с последовательным возбуждением – последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой. У генераторов со смешанным возбуждением на главных полюсах размещены две обмотки возбуждения. Одну из них подключают параллельно обмотке якоря, а другую - последовательно с ними.

У генератора с независимым возбуждением обмотка возбуждения, расположенная на главных полюсах, питается током  $I_b$  от постороннего источника постоянного тока, не имеющего электрической связи с обмоткой якоря. Генераторы малой мощности могут иметь независимое возбуждение от постоянных магнитов.

### 4.2 Лабораторная работа №2 (ЛР-2) Двигатель постоянного тока.

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Машины постоянного тока применяются в основном в качестве электродвигателей. Основное достоинство их состоит в возможности плавного и глубокого регулирования частоты вращения, а также в значительной перегрузочной способности. Конструктивно двигатель постоянного тока состоит из двух основных частей – статора и ротора. На статоре находятся основные полюса с обмоткой параллельного возбуждения, которые создают основное магнитное поле, и дополнительные полюса, компенсирующие размагничивающее действие реакции якоря и тем самым улучшающие коммутацию.

Ротор является якорем, т. е. той частью машины, где происходит преобразование энергии, наводится ЭДС. Сердечник якоря набирается из отдельных листов электротехнической стали, в пазах сердечника укладывается обмотка, выводы которой подсоединяются к коллектору.

При подключении электродвигателя к сети постоянного тока ток в обмотке якоря  $I_a$  и магнитное поле обмотки возбуждения  $\Phi$ , создаваемое током возбуждения  $I_b$ , обуславливают появление электромагнитного вращающего момента:

$$M = C\Phi I_a, \text{ и ЭДС } E = C\Phi\omega,$$

где  $C$  – конструктивный коэффициент машины.

Произведение момента на частоту вращения  $\omega = E/C\Phi$  даст выражение электромагнитной мощности

$$P_{ЭМ} = M\omega = EI_a = P_2 + \Delta P_{МЭХ} + \Delta P_{МАГ} + \Delta P_{ДОБ},$$

где  $P_2$  - полезная мощность на валу.

Если учесть, что мощность, потребляемая электродвигателем из сети

$$P_1 = P_{ВОЗ} + P_{IЯ} = P_{ВОЗ} + \Delta P_{Э} + P_{ЭМ} = P_{ВОЗ} + \Delta P_{Э} + P_2 + \Delta P_{МЭХ} + \Delta P_{МАГ} + \Delta P_{ДОБ},$$

Полезная мощность на валу будет равна

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{Э} - \Delta P_{МЭХ} - \Delta P_{МАГ} - \Delta P_{ДОБ} - P_{ВОЗ}.$$



### 4.3 Лабораторная работа №3 (ЛР-3) Регулирование частоты вращения ДПТ.

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Трансформатор, у которого обмотки имеют только магнитную связь, может быть заменён эквивалентной электрической схемой, называемой схемой замещения трансформатора (рис. 1).

а

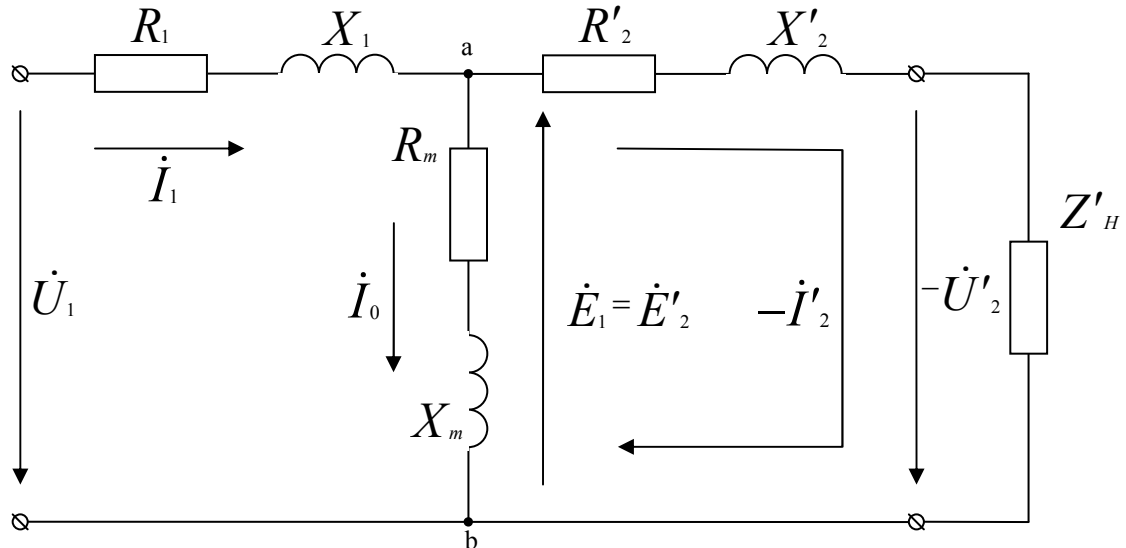


Рис. 1. Схема замещения трансформатора.

В ней сопротивления  $R_1$  и  $X_1$  определяют первичную обмотку, а  $R'_2$  и  $X'_2$  - вторичную. Индуктивные сопротивления  $X_1$  и  $X'_2$  обуславливаются магнитными потоками рассеяния обмоток. Схемы замещения обмоток объединены в точках  $a$  и  $b$ , так называемым намагничивающим, контуром с сопротивлениями  $R_m$  и  $X_m$ . Индуктивное сопротивление  $X_m$  обусловлено магнитным потоком взаимной индукции обмоток, а сопротивление  $R_m$  - потерями мощности в стали магнитопровода. Сопротивления вторичной обмотки  $R'_2 = R_2 * K^2$ ,  $X'_2 = X_2 * K^2$  и нагрузки  $Z'_H = Z_H * K^2$  являются приведёнными к первичной обмотке. Аналогично приведёнными называют значение ЭДС и тока вторичной обмотки:  $E'_2 = E_2 * K$ ,  $I'_2 = I_2 / K$ , где

$K = W_1 / W_2$  - коэффициент трансформации. Такое приведение обеспечивает замену магнитосвязанных цепей электрически связанными цепями.

Таким образом, полная мощность приведённого контура вторичной обмотки в схеме замещения равна мощности вторичной обмотки реального трансформатора:

$$I'_2 * E'_2 = \frac{I_2}{K} * E_2 * K = I_2 * E_2.$$

Применение схем замещения трансформаторов позволяет упростить расчёты и анализ их работы. Параметры схемы замещения определяются из опытов холостого хода и короткого замыкания трансформаторов.

#### **4.4 Лабораторная работа №4 (ЛР-4) Однофазные трансформатор и автотрансформатор.**

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Трансформатор состоит из двух обмоток первичной и вторичной, размещённых на замкнутом магнитопроводе из ферромагнитного материала. Первичную обмотку подключают к источнику переменного напряжения  $U_1$ , а ко вторичной обмотке присоединяют нагрузку с сопротивлением  $Z_n$ . При этом в его первичной обмотке возникает переменный ток  $i_1$ , создающий основной магнитный поток  $\Phi$ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток индуцирует в обеих обмотках переменные ЭДС

$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}$  и  $e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$ . Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называется коэффициентом трансформации  $K = E_{вн}/E_{нн} = W_{вн}/W_{нн} \approx U_{вн}/U_{нн}$ .

В зависимости от конфигурации магнитопровода трансформаторы подразделяются на стержневые, броневые и тороидальные. В трансформаторах стержневого типа обмотки располагаются на нескольких стержнях и как бы охватывают магнитопровод. Часть магнитопровода, на которой обмотки отсутствуют, называется ярмом. В броневого конструкции обмотки располагаются на одном стержне и окружены магнитопроводом со всех сторон. В тороидальных – магнитопровод навит из ленты трансформаторной стали, имеет форму тороида и полностью охвачен обмоткой.

Автотрансформатором называется такой трансформатор, у которого обмотка низшего напряжения является частью обмотки высшего напряжения, т. е. обмотки электрически связаны. Поэтому в автотрансформаторе мощность передаётся как электромагнитным путём, так и электрическим. Мощность, передаваемая автотрансформатором, равная сумме его электромагнитной и электрической мощности, называется проходной ( $S_p$ ) мощностью.

Автотрансформатор по сравнению с трансформатором при одинаковой проходной мощности имеет меньшие потери в обмотках, меньшее напряжение короткого замыкания, меньшую массу обмоток и больший КПД. Наиболее выгодны для автотрансформаторов коэффициенты трансформации от 1,1 до 2. Автотрансформаторы применяются для пуска синхронных и асинхронных электродвигателей, как делители напряжения в испытательных лабораториях, на линиях передачи высокого напряжения для связи систем с различными напряжениями.

#### **4.5 Лабораторная работа №5 (ЛР-5) Параллельная работа трансформаторов.**

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

При параллельной работе трансформаторов необходимо, чтобы при холостом ходе в их обмотках не протекали уравнивающие токи, бесполезно нагружающие трансформаторы. Необходимо также, чтобы общая нагрузка трансформаторов распределялась между ними пропорционально их номинальным мощностям.

В связи с этим параллельная работа трансформаторов допускается при следующих условиях:

- Трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации. Согласно стандарту включение трансформаторов на параллельную работу допускается, если разница в коэффициентах трансформации не превышает 0,5% их среднего значения

$$\delta K\% = \frac{K_I - K_{II}}{\sqrt{K_I * K_{II}}} 100\% \leq 0,5. \quad (1)$$

- Допустимый уравнильный ток в процентах от номинального не должен превышать

$$I_{ур.д} \% = \frac{\delta K_{д} \% 100\%}{u_{KI} \% + u_{KII} \%}. \quad (2)$$

- Вторичные ЭДС трансформаторов ( $E_{2I}$  и  $E_{2II}$ ) должны совпадать по фазе.

- Трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания. Допускается разница в  $U_K$  не более 10% их среднего арифметического значения

$$u_{KI} - u_{KII} \leq 0,1 \frac{u_{KI} + u_{KII}}{2} \quad (3)$$

- Нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется прямо пропорционально их номинальным мощностям и обратно пропорционально напряжениям короткого замыкания

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{u_{KII} S_{НОМ I}}{u_{KI} S_{НОМ II}} \quad (4)$$

Номинальные мощности трансформаторов не должны отличаться более чем в три раза.

#### **4.6 Лабораторная работа №6 (ЛР-6) Несимметричные режимы работы трёхфазного трансформатора.**

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

В трансформаторах со схемами соединения  $Y/Y_n$ ,  $\Delta/Y_n$ ,  $Y/Z_n$  при несимметричной нагрузке во вторичных в токах имеют место составляющие нулевой последовательности. При отсутствии в первичных обмотках контуров для протекания токов нулевой последовательности они не трансформируются в первичную обмотку. В результате токи нулевой последовательности вторичной обмотки, не уравновешенные аналогичными токами первичной обмотки, становятся намагничивающими, т. е. создают, протекая по вторичной обмотке, свои магнитные поля нулевой последовательности. Эти магнитные поля наводят в фазах первичной и вторичной обмоток электродвижущие силы (ЭДС), которые, накладываясь на ЭДС, наведённые основным магнитным потоком первичной обмотки, искажают симметрию фазных напряжений. В зависимости от схемы соединения обмоток искажение симметрии различно.

#### **4.7 Лабораторная работа №7 (ЛР-7) Трёхфазная асинхронная машина в режимах с заторможенным ротором.**

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

В ряде специальных установок асинхронная машина с фазным ротором, помимо прямого назначения (как двигатель), используется при заторможенном роторе в качестве поворотного трансформатора для изменения фазы выходного напряжения (фазорегулятор), поворотного автотрансформатора для изменения выходного напряжения по величине (индукционный регулятор), регулируемого индуктивного сопротивления (регулируемая индуктивная катушка). Для торможения и поворота ротора предназначена самотормозящаяся червячная передача.

### Фазорегулятор

Обмотка статора подключается к сети переменного тока, а к обмотке ротора подключается трёхфазная нагрузка. Если ротор повернуть против вращения поля, то магнитный поток сначала пересекает обмотку ротора, а затем обмотку статора. Вследствие этого ЭДС ротора будет опережать ЭДС статора на угол  $\alpha$ . Таким образом, путём поворота ротора можно получить любой сдвиг по фазе выходного напряжения  $U_2$  от входного напряжения  $U_1$

$$u_2 = U_{2m} \sin(\omega t \pm \alpha)$$

### Индукционный регулятор

Обмотку ротора подключают к трёхфазной сети, и она является первичной, а обмотку статора (проходную) подключают последовательно между сетью и нагрузкой. Напряжение на нагрузке будет равно сумме фазного напряжения сети и ЭДС проходной обмотки и будет изменяться при повороте ротора от  $U_{\min} = (U_{1\phi} - E_2)$  до  $U_{\max} = (U_{1\phi} + E_2)$ . В общем случае для любого угла поворота  $\alpha$  электрических градусов

$$U_{2\phi} = \sqrt{(U_{1\phi} + E_2 \cos \alpha)^2 + (E_2 \sin \alpha)^2}.$$

### Регулируемая реактивная катушка

Обмотки статора и ротора соединяются последовательно. При изменении положения ротора изменяется взаимная индуктивность обмоток, что приводит к изменению индуктивности фазы реактивной катушки от  $L_{\max} = L_1 + L_2 + 2L_{12}$  до  $L_{\min} = L_1 + L_2 - 2L_{12}$ .

## 4.8 Лабораторная работа №8 (ЛР-8) Исследование АД с КЗР в режимах холостого хода и короткого замыкания.

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Если определение рабочих характеристик асинхронных электродвигателей опытным путём затруднено, прибегают к построению круговых диаграмм электродвигателей. Данные для их построения получают из опытов «холостого хода» и «короткого замыкания».

Опыт холостого хода проводят при номинальном напряжении и работе электродвигателя без нагрузки на валу. В этом режиме скольжение электродвигателя  $s \approx 0$ , а потребляемая из сети мощность  $P_0$  практически затрачивается на магнитные и механические потери. В процессе опытов измеряют фазные ток и напряжение, потребляемую электродвигателем

мощность или коэффициент мощности. При чём  $\cos \varphi_{10} = P_0 / (3 U_{1x} I_{10})$ .

Для повышения точности построения круговой диаграммы потребляемую при холостом ходе мощность можно разделить на магнитные и механические потери. Для этого снимают зависимость  $P_0 = f(U_1^2)$  и на пересечении её с осью ординат определяют значение  $P_{\text{мех}}$ .

Опыт короткого замыкания проводят с заторможенным ротором ( $s=1$ ) и при пониженном напряжении питания  $U_{1к}$ , обеспечивающем ток в статоре  $I_{1к} = I_{\text{ном}}$ . При проведении опытов также измеряют фазные напряжение и ток, потребляемую электродвигателем мощность или коэффициент мощности. При чём  $\cos \varphi_{1к} = P_{\kappa} / (3 U_{1к} I_{1к})$ .

По данным опыта вычисляют ток короткого замыкания при номинальном напряжении питания  $I_{1к.ном} = I_{1к} U_{1ном} / U_{1к}$ , коэффициент мощности или мощность

короткого замыкания и активное сопротивление рабочего контура Г-образной схемы замещения при  $s=1$ :  $R_{\kappa} = R_1 + R'_2 = P_{\kappa} / (3 I_{1\kappa}^2)$ . Измерив предварительно активное сопротивление обмотки статора  $R_1$ , находят приведённое активное сопротивление ротора  $R'_2$ .

#### 4.9 Лабораторная работа №9 (ЛР-9) Трёхфазный асинхронный электродвигатель в однофазном режиме.

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Круговое магнитное поле может быть образовано не только трёхфазной, но и двухфазной системой намагничивающих сил. При подключении трёхфазного асинхронного двигателя к однофазной сети для образования вращающего момента используют двухфазную систему МДС. В двухфазной системе необходимо иметь две обмотки, сдвинутые в пространстве на угол 90 электрических градусов, а токи в этих обмотках должны быть сдвинуты во времени на угол  $\pi/2$ . Суммарная намагничивающая сила этих обмоток будет вращающейся.

Для сдвига намагничивающих сил во времени в фазу А электродвигателя включают фазосмещающее сопротивление, которое может быть активным, индуктивным или ёмкостным. Наилучшее условие пуска будет при включении ёмкостного сопротивления, наихудшее – при включении индуктивного сопротивления.

#### 4.10 Лабораторная работа №10 (ЛР-10) Асинхронный генератор.

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

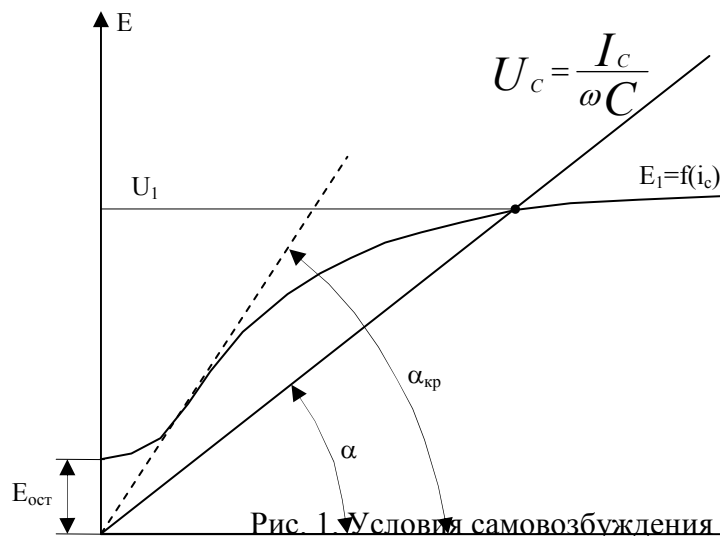
При увеличении частоты асинхронной машины с помощью приводного двигателя выше синхронной ( $\omega_2 > \omega_1$ ), машина переходит в генераторный режим. Скольжение машины становится отрицательным:  $s = (\omega_1 - \omega_2) / \omega_1$ , где  $\omega_1 = 2\pi f_1 / 60$  – синхронная частота вращения. В результате этого меняется направление активной составляющей тока ротора относительно двигательного режима:

$$I_{2\text{акт}} = I_2 \cos \psi_2 = \frac{E_2 s}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2 s^2}} \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2 s^2}} \quad (1)$$

В этом режиме машина отдаёт в сеть активную мощность и потребляет из сети реактивную мощность, необходимую для создания вращающегося магнитного поля. Этот генераторный режим (когда асинхронная машина подключена к сети) называется режимом независимого возбуждения.

Наряду с режимом независимого возбуждения асинхронный генератор может работать в режиме самовозбуждения, на изолированную сеть. Необходимый для возбуждения машины реактивный намагничивающий ток получается за счёт подключения параллельно обмотке статора батареи конденсаторов.

При вращении асинхронной машины с помощью приводного двигателя с синхронной скоростью его остаточный магнитный поток пересекает обмотки статора и наводит в них ЭДС. В контуре обмотка-конденсатор возникает ток  $I_C$ , который приближённо можно считать ёмкостным. Этот ток, по времени совпадающий с  $\Phi_{\text{ост}}$ , протекая по обмоткам фаз статора, создаёт свой магнитный поток  $\Phi$ . При этом результирующий магнитный поток в машине увеличится. Возрастание магнитного потока приведёт к возрастанию ЭДС и тока и т.д., т.е. начнётся лавинообразный процесс самовозбуждения до тех пор, пока ЭДС не станет равной напряжению на конденсаторах.



При изменении величины ёмкости конденсаторов изменяется наклон кривой  $U_c = f(I_c)$  и генератор возбуждается до другой величины напряжения  $U_1$ . Если  $X_c$  таково, что характеристика  $U_c = f(I_c)$  проходит касательно к прямолинейному участку характеристики  $E_1=f(i_c)$ , то самовозбуждение генератора не происходит. Значение ёмкости, соответствующее этому режиму, называется критическим. Величина ёмкости, необходимой для возбуждения генератора до номинального напряжения может быть получена из выражения:

$$C = \frac{I_{xx}}{\sqrt{3} U_H 2\pi f} (\Phi), \quad (2)$$

где  $I_{xx}$  – ток холостого хода асинхронной машины в двигательном режиме, равный  $(0,4 \dots 0,6) I_H$ .

Частота генерируемого напряжения определяется из следующих соображений. Напряжение на конденсаторах в установившемся режиме уравнивается ЭДС статора, которая может быть заменена эквивалентным падением напряжения в индуктивном сопротивлении обмотки статора  $X_1$

$$I_c X_1 = I_c X_c.$$

Откуда:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C}}.$$

#### 4.11 Лабораторная работа №11 (ЛР-11) Испытание трёхфазного синхронного генератора.

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

Синхронной называют машину переменного тока, в которой скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля в её рабочем зазоре. Чаще всего синхронная машина используется в качестве генератора и реже в качестве электродвигателя для привода крупных вентиляторов, компрессоров, центробежных насосов, генераторов постоянного тока.

Статор синхронной машины, называемый также якорем, ничем не отличается от статора асинхронного электродвигателя. Ротор же представляет собой явнополюсный или

неявнополюсный электромагнит, обмотка которого питается от внешнего источника постоянного тока через два контактных кольца и щётки. Явнополюсный ротор обычно используется в машинах с четырьмя и более парами полюсов.

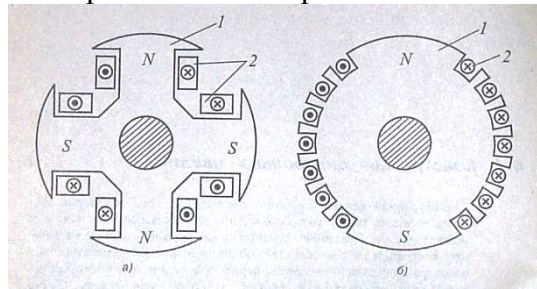


Рис. 4: Конструкция ротора (индуктора) явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) синхронной машины.

При холостом ходе магнитный поток генератора создаётся только обмоткой возбуждения. Этот поток направлен по оси полюсов ротора и индуцирует в фазах обмотки якоря э.д.с.

$$E_0 = 4,44 f_1 \omega_1 k_{об1} \Phi_0$$

Формула 1

При появлении тока в обмотках статора взаимодействие намагничивающих сил статора и ротора приводит к изменению картины магнитного поля в зазоре генератора. Это влияние называется реакцией якоря. При чисто активной нагрузке реакция якоря - поперечная, при чисто индуктивной - продольная размагничивающая, а при чисто ёмкостной – продольная намагничивающая. В генераторном режиме поперечная реакция якоря приводит к усилению магнитного поля на сбегающем крае полюса и ослаблению – на набегающем ( в двигательном – наоборот). Для всех режимов работы и видов нагрузки синхронного генератора характерно изменение результирующего магнитного поля при действии реакции якоря и изменение его э.д.с.