

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

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

Б1.В.02 Электрические машины и агрегаты

Направление подготовки (специальность) 35.04.06 – Агроинженерия

Профиль образовательной программы «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве»

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Организация самостоятельной работы	3
2. Методические рекомендации по выполнению индивидуальных домашних заданий	4
3. Методические рекомендации по самостояльному изучению вопросов	17
4. Методические рекомендации по подготовке к занятиям	40

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 (СИВ)	подготовка к занятиям (ПкЗ)
1	2	3	4	5	6	7
1	Принципы работы, конструкция и основные соотношения в теории машин постоянного тока	-	-	-	-	4
2	Двигатели и генераторы постоянного тока	-	-	-	15	5
3	Принцип работы, конструкция и основные соотношения в теории трансформаторов	-	-	-	-	4
4	Однофазные и трехфазные трансформаторы	-	-	-	15	5
5	Принцип работы, конструкция и основные соотношения в теории асинхронных машин	-	-	-	-	4
6	Работа асинхронных машин в двигательном и генераторном режимах	-	-	-	15	5
7	Принцип работы, конструкция и основные соотношения в теории синхронных машин	-	-	-	-	4
8	Работа синхронных машин в двигательном и генераторном режимах	-	-	-	15	5

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ

2.1 Темы индивидуальных домашних заданий

Индивидуальное домашнее задание выполняется в виде контрольной работы.

Работа выполняется по вариантам. Для выполнения контрольной работы студент должен изучить все разделы дисциплины.

2.2 Содержание индивидуальных домашних заданий

Контрольная работа включает в себя решение 4-х задач по разделам: машины постоянного тока, трансформаторы, асинхронные машины и синхронные машины. Вариант каждой задачи в зависимости от заданного преподавателем для каждого конкретного студента варианта контрольной работы определяется по нижеследующей таблице.

Вариант контрольной работы	Вариант задачи №1	Вариант задачи №2	Вариант задачи №3	Вариант задачи №4	Вариант контрольной работы	Вариант задачи №1	Вариант задачи №2	Вариант задачи №3	Вариант задачи №4
1	1	1	1	1	36	1	36	5	8
2	2	2	2	2	37	2	37	1	7
3	3	3	3	3	38	3	38	2	1
4	4	4	4	4	39	4	39	3	2
5	5	5	5	5	40	5	40	4	3
6	6	6	6	6	41	6	1	5	4
7	7	7	7	7	42	7	2	6	5
8	8	8	8	8	43	8	3	7	6
9	9	9	9	9	44	9	4	8	7
10	10	10	10	10	45	10	5	9	8
11	11	11	1	9	46	11	6	10	9
12	12	12	2	1	47	12	7	1	10
13	13	13	3	2	48	13	8	2	1
14	14	14	4	3	49	14	9	3	2
15	15	15	5	4	50	15	10	4	3
16	16	16	6	5	51	16	11	5	4
17	17	17	7	6	52	17	12	6	5
18	18	18	8	7	53	18	13	7	6
19	19	19	9	8	54	19	14	8	7
20	20	20	10	9	55	20	15	9	8
21	1	21	8	10	56	1	16	10	9
22	2	22	1	8	57	2	17	7	10
23	3	23	2	1	58	3	18	1	6
24	4	24	3	2	59	4	19	2	1
25	5	25	4	3	60	5	20	3	2
26	6	26	5	4	61	6	21	4	3
27	7	27	6	5	62	7	22	5	4
28	8	28	7	6	63	8	23	6	5
29	9	29	8	7	64	9	24	7	6
30	10	30	9	8	65	10	25	8	7
31	16	31	10	9	66	11	11	9	8
32	17	32	1	10	67	12	12	10	9
33	18	33	2	3	68	13	13	8	10

34	19	34	3	4		69	14	14	9	5
35	20	35	4	5		70	15	15	10	6

2.3 Порядок выполнения заданий

Условия задач и данные для различных вариантов приведены ниже.

Задача №1

Условие задачи: Трёхфазный силовой трансформатор после ремонта имеет данные в зависимости от варианта, представленные в таблице 1.

Исходные данные для решения задачи №1

Таблица 1

№ в-та	S _H , кВА	U _{1H} , В	U _{2H} , В	u _k , %	i ₀ , %	P ₀ , Вт	P _{K3} , Вт	Cosφ ₂
1	1002	10010	380	8,2	2,1	3020	10100	0,81
2	998	10015	385	7,9	2,2	2950	9950	0,85
3	1005	9900	400	8,1	1,9	3040	10150	0,79
4	995	10020	410	7,8	1,8	3060	10200	0,78
5	1008	9950	405	8,3	2,3	3090	9900	0,84
6	993	10035	390	7,5	1,7	3100	10500	0,86
7	1010	9960	395	8,5	1,6	2980	10450	0,77
8	990	10080	415	7,2	2,4	3120	10600	0,76
9	1012	9980	380	8,4	2,5	2910	9800	0,75
10	987	10095	385	7,0	2,1	3150	10550	0,82
11	1015	10010	400	8,2	2,2	3180	10650	0,74
12	980	10015	410	7,9	1,9	3040	9850	0,83
13	995	9900	405	8,1	1,8	3060	10100	0,77
14	1008	10020	390	7,8	2,3	3090	9950	0,76
15	993	9950	395	8,3	1,7	3100	10150	0,75
16	1010	10035	415	7,5	1,6	2980	10200	0,82
17	990	9960	400	8,5	2,4	3120	9900	0,74
18	1012	10080	410	7,2	2,5	2910	10500	0,83
19	987	9980	405	8,4	2,6	3150	10450	0,78
20	1015	10095	390	7,0	2,6	3180	10600	0,84

Требуется:

1. Определить коэффициент трансформации.
2. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания определить параметры схемы замещения и изобразить схему.
3. Определить максимальное значение КПД. Рассчитать и построить зависимость КПД от нагрузки $\eta=f(\beta)$, где β – коэффициент нагрузки, равный S/S_H .
4. Рассчитать и построить зависимость изменения напряжения на зажимах вторичной обмотки от характера нагрузки, т. е. $\Delta U=f(\phi)$ при номинальном токе.
5. Установить распределение нагрузки между трансформаторами одинаковой заданной для решаемого варианта мощности, если напряжение короткого замыкания второго трансформатора на 10% больше напряжения короткого замыкания первого (указанного в исходных данных), а нагрузка равна сумме номинальных мощностей обоих трансформаторов.

Задача №2

Условие задачи: Трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором питается от трёхфазной сети с линейным напряжением U_1 , частотой 50 Гц. Величины, характеризующие номинальный режим двигателя: мощность на валу P_{2H} , номинальная частота вращения n_H , коэффициент мощности $\cos\phi_H$ и полезного действия η_H , кратности

критического K_M и пускового моментов K_Π , кратность пускового тока i_Π приведены для разных вариантов в таблице 2.

Варианты для решения задачи №2

Таблица 2

№ вар	Тип двигателя	U_1 , В	P_{2H} , кВт	s_H , %	n_H , об/мин	$\cos\phi_H$	η_H , %	K_M	K_Π	i_Π
1	4A63B2У3	220	0,55	?	2740	0,86	73	2,2	2	5
2	4A71A2У3	380	0,75	?	2840	0,87	77	2,2	2	5,5
3	4A71B2У3	660	1,1	?	2810	0,87	77,5	2,2	2	5,5
4	4A80A2У3	220	1,5	?	2850	0,85	81	2,2	2	6,5
5	4A80B2У3	380	2,2	?	2850	0,87	83	2,2	2	6,5
6	4A90L2У3	660	3	?	2840	0,88	84,5	2,2	2	6,5
7	4A100S2У3	220	4	?	2880	0,89	86,5	2,2	2	7,5
8	4A100L2У3	380	5,5	?	2880	0,91	87,5	2,2	2	7,5
9	4A112M2У3	660	7,5	?	2900	0,88	87,5	2,2	2	7,5
10	4A132M2У3	220	11	?	2900	0,9	88	2,2	1,6	7,5
11	4A160S2У3	380	1,5	?	2940	0,91	88	2,2	1,4	7,5
12	4A160M2У3	660	18,5	?	2940	0,92	88,5	2,2	1,4	7,5
13	4A180S2У3	220	22	?	2940	0,91	88,5	2,2	1,4	7,5
14	4A180M2У3	380	30	?	2945	0,9	90,5	2,2	1,4	7,5
15	4A200M2У3	660	37	?	2945	0,89	90	2,2	1,4	7,5
16	4A200L2У3	220	45	?	2945	0,9	91	2,2	1,4	7,5
17	4A225M2У3	380	55	?	2945	0,92	91	2,2	1,2	7,5
18	4A250S2У3	660	75	?	2960	0,89	91	2,2	1,2	7,5
19	4A250M2У3	220	90	?	2960	0,9	92	2,2	1,2	7,5
20	4A280S2У3	380	110	?	2970	0,89	91	2,2	1,2	7
21	4A71A4У3	220	0,55	?	1390	0,7	70,5	2,2	2	4,5
22	4A71B4У3	380	0,75	?	1390	0,73	72	2,2	2	4,5
23	4A80A4У3	660	1,1	?	1420	0,81	75	2,2	2	5
24	4A80B4У3	220	1,5	?	1415	0,83	77	2,2	2	5
25	4A90L4У3	380	2,2	?	1425	0,83	80	2,2	2	6
26	4A100S4У3	660	3	?	1435	0,83	82,0	2,4	2	6
27	4A100L4У3	220	4	?	1430	0,84	84	2,4	2	6
28	4A112M4У3	380	5,5	?	1445	0,85	85,5	2,2	2	7
29	4A132S4У3	660	7,5	?	1455	0,86	87,5	3	2,2	7,5
30	4A132M4У3	220	11	?	1460	0,87	87,5	3	2,2	7,5
31	4A160S4У3	380	1,5	?	1465	0,88	88,5	2,3	1,4	7
32	4A160M4У3	660	18,5	?	1465	0,88	89,5	2,3	1,4	7
33	4A180S4У3	220	22	?	1470	0,9	90	2,3	1,4	6,5
34	4A180M4У3	380	30	?	1470	0,9	91	2,3	1,4	6,5
35	4A200M4У3	660	37	?	1475	0,9	91	2,5	1,4	7
36	4A200L4У3	220	45	?	1475	0,9	92	2,5	1,4	7
37	4A225M4У3	380	55	?	1480	0,9	92,5	2,5	1,3	7
38	4A250S4У3	660	75	?	1480	0,9	93	2,3	1,2	7
39	4A250M4У3	220	90	?	1480	0,91	93	2,3	1,2	7
40	4A280S4У3	380	110	?	1470	0,9	92,5	2,0	1,2	5,5

Определить:

- число пар полюсов;
- номинальное скольжение ротора относительно магнитного поля статора;
- номинальный фазный ток обмотки статора;
- номинальный момент на валу;
- критическое скольжение и критический момент двигателя;
- пусковой момент при номинальном напряжении и пусковой момент при снижении напряжения на 30%;
- пусковой ток;
- величину ёмкости блока конденсаторов, увеличивающих коэффициент мощности до 0,9.

Изобразить электрическую схему двигателя с включением для повышения коэффициента мощности блока конденсаторов.

Указать три характерные точки механической характеристики двигателя.

Задача №3

Условие задачи: двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальное напряжение U_H , номинальную мощность на валу P_H , номинальную частоту вращения n_H , сопротивление цепи якоря R_y и возбуждения R_B . Данные для различных вариантов приведены в таблице 3.

Технические данные ДПТ

Таблица 3

№ в-та	U_H , В	P_{2H} , Вт	n_H , об/мин	η_H	R_y , Ом	R_B , Ом
1	220	2800	3000	85,500	0,60	190,000
2	110	4000	1500	88,000	0,09	35,493
3	150	1200	1000	81,000	0,84	202,500
4	160	3600	2500	86,000	0,25	81,541
5	250	1600	1200	80,000	1,83	416,667
6	90	5800	4000	87,0	0,05	16,200
7	48	7200	800	88,0	0,01	3,755
8	180	9000	940	87,0	0,12	41,760
9	190	10000	2400	87,0	0,12	41,876
10	24	8000	3200	86,0	0,00253	0,826

Требуется:

1. Изобразить электрическую схему.
2. Рассчитать характеристики двигателя, а именно зависимости:
 - частоты вращения якоря,
 - момента на валу M ,
 - коэффициента полезного действия η ,
 - полезной мощности P_2
 от тока якоря при значениях, равных 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 от номинального значения.

Задача №4

Условие задачи: Явнополюсный синхронный генератор имеет следующие данные в относительных единицах:

- номинальное напряжение U ;
- номинальный ток I ;
- синхронное сопротивление по продольной оси x_d ;
- синхронное сопротивление по поперечной оси x_q ;
- индуктивное сопротивление обратного следования фаз x_2 ;
- индуктивное сопротивление нулевого следования фаз x_0 ;
- угол нагрузки θ .

Их значения для различных вариантов приведены в таблице 4

Технические данные к задаче №4

Таблица 4

№ в-та	U	I	E	x_d	x_q	x_2	x_0	θ , град
1	1	1	1,75	1,02	0,76	0,21	0,049	15
2	1	1	1,78	1,03	0,80	0,22	0,048	16
3	1	1	1,80	1,12	0,72	0,23	0,047	17
4	1	1	1,82	1,14	0,82	0,24	0,046	18
5	1	1	1,84	1,06	0,75	0,25	0,045	19
6	1	1	1,86	1,08	0,81	0,26	0,044	20

7	1	1	1,88	1,16	0,75	0,27	0,043	21
8	1	1	1,90	1,13	0,84	0,28	0,042	22
9	1	1	1,92	1,15	0,77	0,29	0,041	23
10	1	1	1,94	1,,09	0,83	0,30	0,040	24

Требуется:

1. Вычислить относительное значение активной мощности в номинальном режиме.
2. Определить при номинальном возбуждении в относительных единицах установившиеся токи короткого замыкания:
 - трёх фаз;
 - двух фаз;
 одной фазы.

2.4 Пример выполнения задания

5. Примеры решения задач

Задача 1

Трехфазный силовой понижающий трансформатор имеет следующие данные:
тип трансформатора ТС3С-1000/10,
номинальная мощность $S_H = 1000 \text{ кВА}$,
номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1H} = 10 \text{ кВ}$,
номинальное напряжение вторичной обмотки $U_{2H} = 0,4 \text{ кВ}$,
процентное значение напряжения короткого замыкания $u_K = 8 \%$,
процентное значение тока холостого хода $i_0 = 2 \%$,
потери холостого хода $P_0 = 3 \text{ кВт}$,
потери короткого замыкания $P_{K3} = 10 \text{ кВт}$,
коэффициент мощности $\cos\phi_2 = 0,8$.
Фазы первичной и вторичной обмоток соединены "звездой".

Требуется:

1. Определить коэффициент трансформации.
2. По данным опытов холостого хода и короткого замыкания определить параметры схемы замещения и изобразить схему.
3. Рассчитать зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(\beta)$, где коэффициент нагрузки $\beta = S/S_H$. Определить максимальное значение КПД η .
4. Рассчитать зависимость изменения напряжения на зажимах вторичной обмотки от характера нагрузки, т.е. $\Delta U = f(\phi)$ при номинальном токе.
5. Установить распределение нагрузки между трансформаторами одинаковой мощности, если напряжение короткого замыкания второго трансформатора на 10% больше первого (указанного в исходных данных), а нагрузка равна сумме номинальных мощностей обоих трансформаторов.

Решение

1. Коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{10}{0,4} = 25$$

2. Номинальный ток первичной обмотки трехфазного трансформатора при соединении фаз "звездой", А

$$I_{1H} = I_{1\phi H} = \frac{S_H}{3U_{1\phi H}} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 57,735 \text{ А},$$

$$\text{где } U_{1\phi H} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = 5773,5 \text{ В.}$$

Активное сопротивление короткого замыкания , Ом

$$r_{K3} = \frac{P_{K3}}{3I_{1\phi H}^2} = \frac{10000}{3 \cdot 57,735^2} = 1,0 \text{ Ом}$$

Полное сопротивление короткого замыкания , Ом

$$z_{K3} = \frac{u_{K3}U_{1\phi H}}{I_{1\phi H}} = \frac{0,08 \cdot 5773,5}{57,735} = 8 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания , Ом

$$x_{K3} = \sqrt{z_{K3}^2 - r_{K3}^2} = \sqrt{8^2 - 1} = 7,94$$

Параметры обмоток, Ом

$$r_1 = r_2 = \frac{r_{K3}}{2} = 0,5; \quad x_1 = x_2 = \frac{x_{K3}}{2} = 3,97$$

Полное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$z_m = \frac{U_{10H}}{i_0 \cdot I_{1H}} = \frac{5773,5}{0,02 \cdot 57,735} = 5000$$

Активное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$r_m = \frac{P_0}{3 \cdot (i_0 \cdot I_{1H})^2} = \frac{3000}{3 \cdot (0,02 \cdot 57,735)^2} = 750$$

Индуктивное сопротивление намагничивающего контура, Ом

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2} = \sqrt{5000^2 - 750^2} = 4940$$

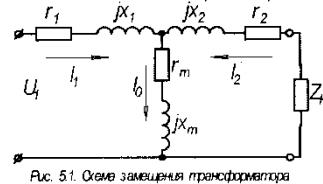


Рис. 5.1. Схема замещения трансформатора

3. КПД трансформатора

$$\text{КПД } \eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где $P_2 = \beta S_H \cos \varphi_2$ - полезная мощность,
 $\cos \varphi_2$ - коэффициент мощности,
 $P_1 = P_2 + \Sigma P$ - потребляемая мощность,
 $\Sigma P = P_0 + \beta P_{KH}$ - сумма потерь.

Отсюда

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{KH}}.$$

Расчеты $\eta = f(\beta)$ сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

$P_0 = 3 \text{ кВт}$, $P_{KH} = 10 \text{ кВт}$, $\cos \varphi_2 = 0,8$

β	$P_2, \text{ кВт}$	$P_K, \text{ кВт}$	$\Sigma P, \text{ кВт}$	$P_1, \text{ кВт}$	$\eta, \%$
0,25	200	0,625	3,625	203,625	98,22
0,50	400	2,5	5,5	405,5	98,64
0,5477	438,2	3,0	6,0	444,2	98,65
0,75	600	5,625	8,625	60,625	98,58
1,00	800	10	13	813	98,40
1,25	1000	15,625	18,625	1018,625	98,17

Максимальное значение КПД η_{\max} соответствует условию равенства постоянных и переменных потерь $P_0 = \beta_{opt}^2 \cdot P_{kh}$

$$\text{Отсюда } \beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kh}}} = \sqrt{\frac{3}{10}} = 0,5477$$

Расчет η_{\max} приведен в таблице 5.1. Значение $\eta_{\max} = 98,65\%$.

4. Процентное изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки

$$\Delta U = u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2 + (u_p \cos \varphi_2 + u_a^2 \sin \varphi_2) / 200 \approx u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2,$$

$$\text{где } u_a = (I_1 \cdot r_K / U_{1\phi H}) 100\% = \frac{57,735 \cdot 1}{5773,5} \cdot 100\% = 1\%$$

$$u_p = \sqrt{u_K^2 - u_a^2} = \sqrt{8^2 - 1} = 7,94\%$$

Расчеты $\Delta U = f_2(\varphi)$ сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 Изменение выходного напряжения ΔU , %

характер нагрузки	φ_2	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$	$u_a \cos \varphi_2$	$u_p \cos \varphi_2$	ΔU , %
индуктивный	0	1	0	1	0	1
	30	0,867	0,5	0,867	3,97	4,84
	60	0,5	0,867	0,5	6,884	7,384
	90	0	1	0	7,94	7,94
емкостной	-30	0,867	-0,5	0,867	-3,97	-3,103
	-60	0,5	-0,867	0,5	-6,884	-6,384
	-90	0	-1	0	-7,94	-7,94

5. При параллельной работе двух трансформаторов между трансформаторами распределяется в соответствии с их напряжением короткого замыкания следующим образом:

$$\text{первый трансформатор } S_1 = \frac{u_{k2}}{u_{k1} + u_{k2}} \cdot S_{H\Gamma}$$

$$\text{второй трансформатор } S_2 = \frac{u_{k1}}{u_{k1} + u_{k2}} \cdot S_{H\Gamma}.$$

По условию задания $u_{k1} = 8\%$, $u_{k2} = 1,1 \cdot u_{k1} = 8,8\%$, $S_{H\Gamma} = 2S_H = 2000 \text{ кВА}$,

$$S_1 = \frac{8,8}{8+8,8} \cdot 2000 = 1047,62 \text{ кВА}, \quad S_2 = \frac{8}{8+8,8} \cdot 2000 = 952 \text{ кВА}.$$

Таким образом, первый трансформатор перегружен, а второй недогружен примерно 5 %.

Задача 2

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором питается от трехфазной сети с линейным напряжением U_1 , частотой 50 Гц. Величины, характеризующие номинальный режим двигателя: мощность на валу P_{2H} , синхронная частота вращения n_1 , номинальное скольжение s_H , коэффициент мощности $\cos\phi_H$ и полезного действия η_H , кратности критического k_M и пускового моментов k_P , кратность пускового тока i_P приведены в таблице 5.5. Соединение обмоток статора - "треугольник".

Таблица 5.5

Данные для расчета

Тип двигателя	U_1 , В	P_{2H} , кВт	n_1 об/мин	s_H %	$\cos\phi_H$	η_H %	k_M	k_P	i_P
4A132S4У3	220	7,5	1500	2,9	0,86	87,5	3,0	2,2	7,5

Определить:

- число пар полюсов;
- номинальную частоту вращения ротора;
- номинальный фазный ток обмотки статора;
- номинальный момент на валу;
- критическое скольжение и момент двигателя;
- пусковой момент при номинальном напряжении и снижении его значения на 10%;
- указать три характерные точки механической характеристики двигателя;
- пусковой ток;
- величину емкости блока конденсаторов, увеличивающих коэффициент мощности до 0,95 и изобразить электрическую схему двигателя с включением блока конденсаторов.

Решение

1. Число пар полюсов обмотки статора

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2$$

2. Номинальная частота вращения ротора, об/мин

$$n_H = n_1(1 - s_H) = 1500(1 - 0,029) = 1456,5$$

3. Номинальное фазное напряжение, В

При соединении в Δ $U_\phi = U_1 = 220$

4. Номинальный фазный ток обмотки статора, А

$$I_{\phi H} = \frac{P_{2H}}{3U_\phi \eta_H \cos\phi_H} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,875 \cdot 0,86} = 15,1$$

5. Номинальный момент на валу, Н·м

$$M_H = \frac{P_{2H} 10^3}{\omega_H} = \frac{7500}{152,45} = 49,2$$

где угловая скорость вращения, 1/с

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1456,6}{60} = 152,45$$

6. Критическое скольжение

$$s_{kp} = s_H (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}) = 0,029(3 + \sqrt{9 - 1}) = 0,17$$

7. Критический момент, Н·м

$$M_M = k_M M_H = 3 \cdot 49,2 = 147,6$$

8. Пусковой момент

При номинальном напряжении, Н·м

$$M_n = k_n M_H = 2,2 \cdot 49,2 = 108,2$$

при пониженном напряжении

$$M'_n = M_n \left(\frac{U}{U_H} \right)^2 = M_n \cdot 0,9^2 = 0,81 \cdot 108,2 = 87,6$$

9. Данные к расчету механической характеристики

Таблица 5.6

Параметры	Режим работы		
	Номинальный	Критический	Пусковой
s	0,029	0,17	1
M, Н·м	49,2	147,6	108,2

10. Пусковой ток, А

$$I_n = i_n I_{\phi H} = 7,5 \cdot 15,1 = 113,25$$

11. Емкость блока конденсаторов, мкФ

$$C = \frac{P_H}{2\pi \cdot f \cdot U_1^2} (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = \frac{7500}{6,28 \cdot 50 \cdot 220^2} (0,593 - 0,3)$$

где φ_1 и φ_2 - соответственно углы сдвига фаз между напряжением и током до включения и после включения блока конденсаторов, град

$$\varphi_1 = \arccos 0,86 = 30,7$$

$$\varphi_2 = \arccos 0,86 = 18,3$$

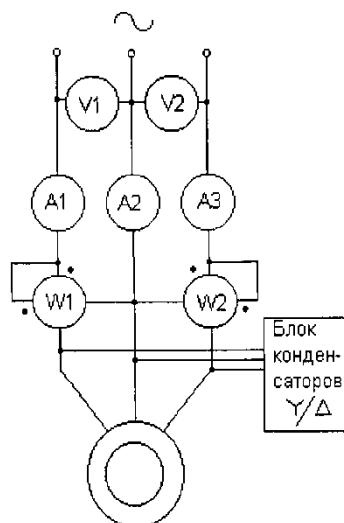


Рис. 5.2. Электрическая схема двигателя с блоком конденсаторов

Задача 3

Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением имеет номинальные данные:
напряжение на зажимах двигателя U_H , мощность на валу P_{2H} , частота вращения n_H , коэффициент полезного действия η_H , сопротивления цепей якоря R_y и возбуждения R_B .

Исходные данные приведены в таблице 5.7

U_H , В	P_{2H} , кВт	n_H , об/мин	η_H , %	R_y , Ом	R_B , Ом
220	2,8	3000	85,5	0,6	190

Изобразить электрическую схему
Рассчитать характеристики двигателя: зависимости
- частоты вращения якоря
- момента на валу M
- коэффициента полезного действия η
- полезной мощности P_2
от тока якоря при значениях, равных 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 от номинального значения.

Решение

1. Расчет номинального режима работы
Номинальная потребляемая мощность, кВт

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta_H} = \frac{2,8}{0,855} = 3,275$$

Номинальный ток, потребляемый двигателем, А

$$I_H = \frac{P_{1H}}{U_H} = \frac{3,275}{220} = 14,88$$

Номинальный ток возбуждения, А

$$I_{BH} = \frac{U_H}{R_B} = \frac{220}{190} = 1,16$$

Номинальный ток якоря, А

$$I_{yH} = I_H - I_{BH} = 14,88 - 1,16 = 13,72$$

Номинальный момент двигателя, Нм

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\omega_H} = \frac{2800}{314} = 8,92$$

где угловая частота $\omega_H = \frac{2\pi \cdot n_H}{60} = \frac{6,28 \cdot 3000}{60} = 314$

Суммарные потери в номинальном режиме работы, кВт

$$\sum P_H = P_{1H} - P_{2H} = 3,275 - 2,8 = 0,475$$

Переменные потери в номинальном режиме (электрические потери в обмотке якоря), кВт

$$P_{KH} = I_{yH}^2 R_y = 13,72^2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} = 0,113$$

Потери на возбуждение, кВт

$$P_B = I_{BH}^2 R_B = 1,16^2 \cdot 190 \cdot 10^{-3} = 0,256$$

Добавочные потери, кВт

$$P_{\text{добр}} = 1\% P_{\text{н}} = 0,0327$$

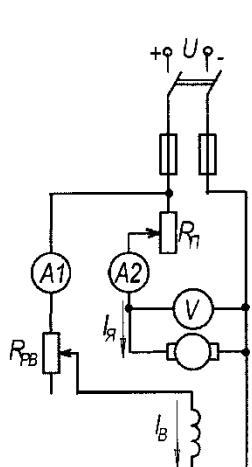
Постоянные потери (потери в стали и механические), кВт

$$P_0 = \sum P_{\text{н}} - P_{\text{кн}} - P_{\text{в}} - P_{\text{добр}} = 0,475 - 0,113 - 0,256 - 0,033 = 0,0733$$

2. Расчет режима работы при текущем значении тока якоря

Предполагаем, что магнитный поток остается постоянным.

Потребляемый ток двигателя



$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{вн}}$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = U_{\text{н}} I$$

Частота вращения

$$n = n_{\text{н}} \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U_{\text{н}} - I_{\text{вн}} R_{\text{я}}}, \quad \omega = \frac{2\pi n}{60}.$$

Потери

$$P_{\text{кн}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} = P_{\text{кн}} k_1^2;$$

$$P_{\text{добр}} = P_{\text{добр}} k_1^2;$$

$$\sum P = P_{\text{кн}} + P_{\text{вн}} + P_0 + P_{\text{добр}},$$

причем для простоты расчета принимаем, что потери холостого P_0 с нагрузкой практически не меняются.

Полезная мощность

$$P_2 = P_1 - \sum P,$$

Момент на валу

$$M = \frac{P_2}{\omega},$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Результаты расчета даны в таблице 5.8

Таблица 5.8

Характеристики двигателя

$U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$, $I_{\text{вн}} = 1,16 \text{ А}$, $P_{\text{вн}} = 0,225 \text{ кВт}$, $P_0 = 0,0733 \text{ кВт}$

Параметры	$k_1 = I_{\text{я}} / I_{\text{вн}}$			
	0,25	0,5	0,75	1,0
$I_{\text{я}}$, А	3,43	6,86	10,29	13,72
I , А	4,59	8,02	11,45	14,88
P_1 , кВт	1,01	1,764	2,52	3,275
n , об/мин	3087	3058	3029	3000
ω , 1/с	323	320	317	314
$P_{\text{кн}}$, кВт	0,007	0,0282	0,0636	0,113
$P_{\text{добр}}$, кВт	0,0002	0,0008	0,0018	0,0033
ΣP , кВт	0,337	0,359	0,395	0,475
P_2 , кВт	0,673	1,405	2,12	2,8
M , Нм	2,08	4,39	6,69	8,62
η , %	66,6	79,6	84,2	85,5

Задача 4

Явнополюсный синхронный генератор имеет следующие данные в относительных единицах:

номинальное напряжение $U = 1$

номинальный ток $I = 1$

номинальная ЭДС $E = 1,87$

синхронное сопротивление по продольной оси $x_d = 1,1$

синхронное сопротивление по поперечной оси $x_q = 0,75$

индуктивное сопротивление обратного следования фаз $x_2 = 0,25$

индуктивное сопротивление нулевого следования фаз $x_0 = 0,045$

Вычислить относительное значение активной мощности в номинальном режиме, если угол нагрузки $\Theta = 20^\circ$.

Определить при номинальном возбуждении в относительных единицах установившиеся токи короткого замыкания

- трех фаз;
- двух фаз;
- одной фазы.

Решение

1. Активная мощность в относительных единицах

$$P = \frac{E \cdot U}{x_d} \cdot \sin \theta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = \frac{1,87}{1,1} 0,342 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,75} - \frac{1}{1,1} \right) 0,643 = 0,717$$

2. Установившиеся токи при коротком замыкании в относительных единицах

Значение тока короткого замыкания определяется равенством

$$i_{ik} = \frac{E}{Z_k},$$

где E и Z_k - соответственно ЭДС и сопротивление, соответствующее виду короткого замыкания

Трехфазное замыкание

$$I_{K(3)} = \frac{E_K}{x_d} = \frac{1,87}{1,1} = 1,7$$

Двухфазное замыкание

$$I_{K(2)} = \frac{E_0 \sqrt{3}}{x_d + x_2} = \frac{1,87 \sqrt{3}}{1,1 + 0,25} = 2,4$$

Однофазное замыкание

$$I_{K(1)} = \frac{3E_0}{x_d + x_2 + x_0} = \frac{3 \cdot 1,87}{1,1 + 0,25 + 0,045} = 2,15$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 5.16

Таблица 5.16

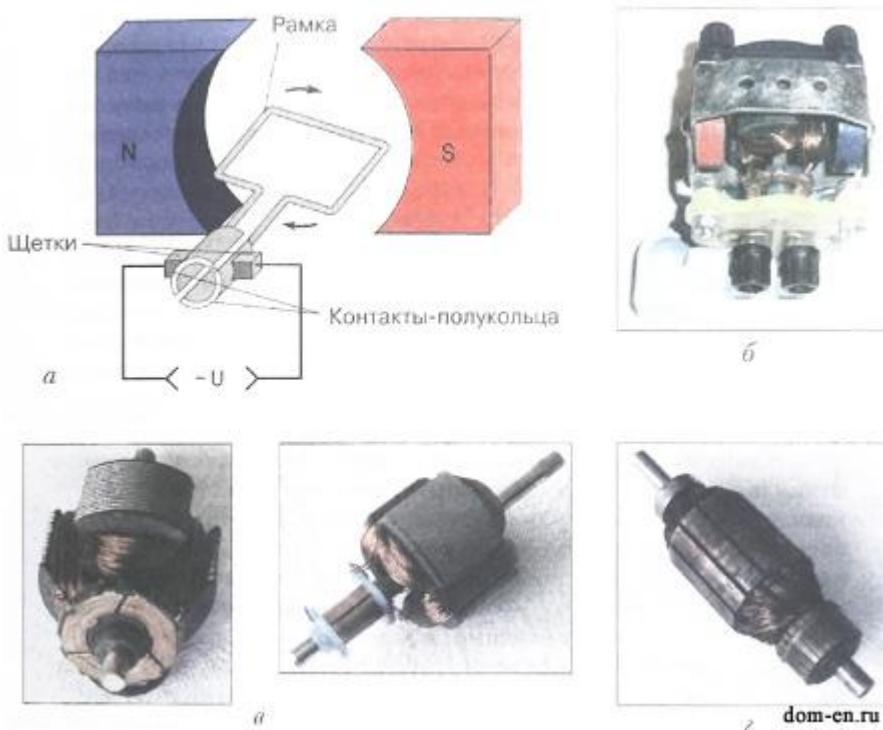
Параметры	Короткое замыкание		
	трех фаз	двух фаз	одной фазы
Z_k , о.е.	1,1	1,35	1,395
E_k , о.е.	1,87	3,24	5,61
i_k , о.е.	1,7	2,4	2,15

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

3.1 Сварочные генераторы. Универсальный коллекторный двигатель.

Принцип действия коллекторного электродвигателя (рис.) основан на следующем: если проводник с током — рамку прямоугольной формы, имеющую ось вращения, — поместить между полюсами постоянного магнита (или электромагнита), то эта рамка начнет вращаться. Направление вращения будет зависеть от направления тока в рамке. Ток в рамку от источника постоянного тока может подаваться через контакты-полукольца, прикрепленные к концам рамки, и через упругие скользящие контакты — щетки (рис. а). Отметим, что вращающаяся часть электродвигателя называется якорем, а неподвижная — статором.

Контакты-полукольца обеспечивают переключение тока в рамке через каждые пол оборота, т. е. непрерывное вращение рамки в одном направлении. У реальных коллекторных двигателей таких рамок много, поэтому вся контактная окружность делится уже не на две, а на большее количество контактов.



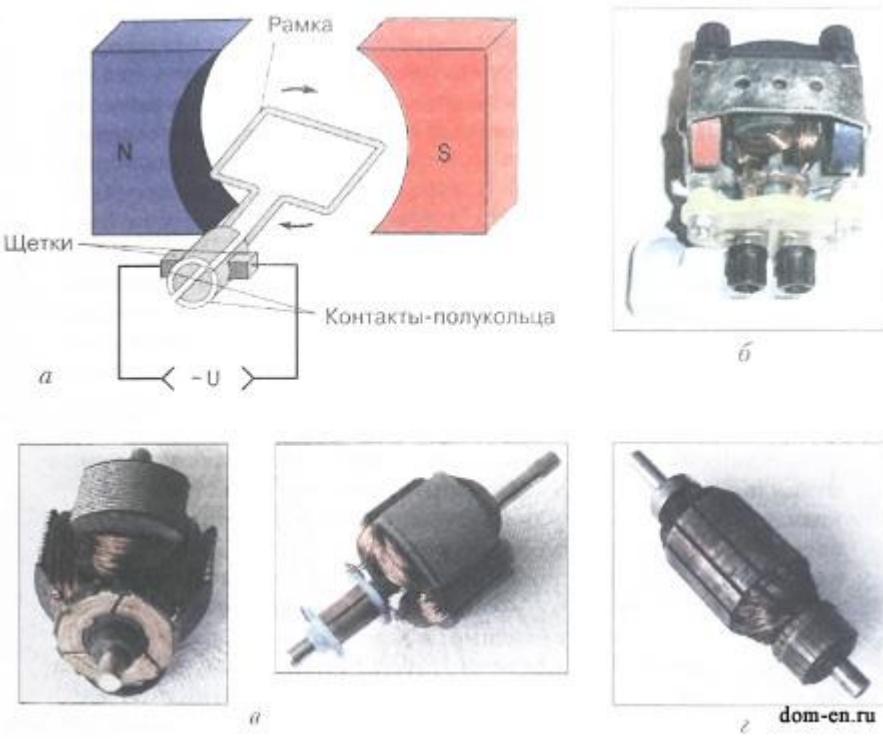


Рис.. Коллекторный электродвигатель: а — принцип действия; б — учебный коллекторный двигатель; в — якори учебных коллекторных двигателей; г — якорь реального

электродвигателя

Эти контакты образуют коллектор — отсюда и название этого электродвигателя. Контакты коллектора изготавливают из меди, а щетки — из графита. Простейший ремонт электродвигателя заключается в замене щеток, запасной комплект которых часто прилагается при продаже устройств с такими двигателями. Коллекторные электродвигатели имеют широкое применение

Коллекторные электродвигатели. Они названы по одному из узлов ротора — коллектору (цилиндр, набранный из изолированных пластинок меди, к которому припаяны концы проводов обмотки). С коллектором соприкасаются щетки статора. Коллектор подводит ток к обмотке ротора, последовательно соединенной с обмоткой статора.

3.2 Схемы и группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов.

Внезапное трехфазное короткое замыкание на выводах вторичной обмотки.

Параллельная работа трехфазных трансформаторов.

1. Группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов

Трансформаторы делят на группы в зависимости от сдвига по фазе между линейными напряжениями, измеренными на одноименных зажимах. В однофазном трансформаторе напряжения первичной и вторичной обмоток могут совпадать по фазе или быть сдвинутыми на 180° . Это зависит от направления намотки обмоток и обозначения выводов, т. е. от маркировки. Если обмотки трансформатора намотаны в одну сторону и имеют симметричную маркировку выводов (рис. 2.46,а), то индуцированные в них ЭДС имеют одинаковое направление. Следовательно, совпадают по фазе и напряжения холостого хода*. При изменении маркировки выводов одной из фаз

или направления намотки одной фазы (рис. 2.46, б) получается сдвиг по фазе между векторами первичного и вторичного напряжения, равный 180° .

Группы соединений обозначают целыми числами от 0 до 11. Номер группы определяют величиной угла, на который вектор линейного напряжения обмотки НН отстает от вектора линейного напряжения обмотки ВН. Для определения номера группы этот угол следует разделить на 30° .

* Для внешней нагрузки (потребителя) ЭДС и напряжения имеют одинаковую фазу.

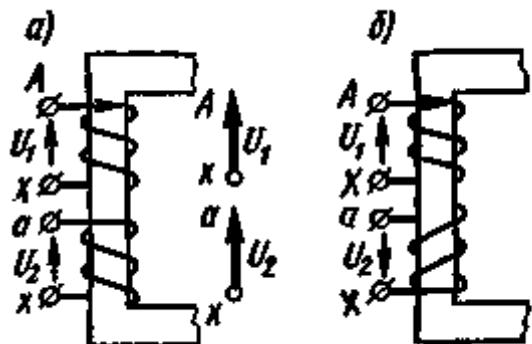


Рис. 2.46. Группы соединений обмоток однофазного трансформатора

Для однофазных трансформаторов возможны только две группы соединений: нулевая (рис. 2.46, а) и шестая (рис. 2.46, б). Однако отечественная промышленность выпускает однофазные трансформаторы только нулевой группы, у которых напряжения первичной и вторичной обмоток совпадают по фазе (см. табл. 2.4).

В трехфазных трансформаторах фазные ЭДС двух обмоток, расположенных на одном и том же стержне, могут, так же как и в однофазных трансформаторах, либо совпадать, либо быть противоположными по фазе. Однако в зависимости от схемы соединения обмоток (У или Д) и порядка соединения их начал и концов получаются различные углы сдвига фаз между линейными напряжениями. Для примера на рис. 2.47 показаны схемы соединения обмоток У/У и соответствующие векторные диаграммы для нулевой (а) и шестой (б) групп; на рис. 2.48 показаны схемы соединения обмоток У/Д и соответствующие векторные диаграммы для одиннадцатой (а) и пятой (б) групп.

Изменяя маркировку выводов обмоток, можно получить и другие группы соединений: при схеме У/У — четные: вторую, четвертую и т. д.; при схеме У/Д — нечетные: первую, третью и др. Согласно ГОСТу отечественная промышленность выпускает трехфазные силовые трансформаторы только двух групп: нулевой и одиннадцатой (см. табл. 2.3). Это облегчает практическое включение трансформаторов на параллельную работу.

Таблица 2.4

Схема соединения обмоток	Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение	
ВН	НН	ВН	НН	
				I/I-0

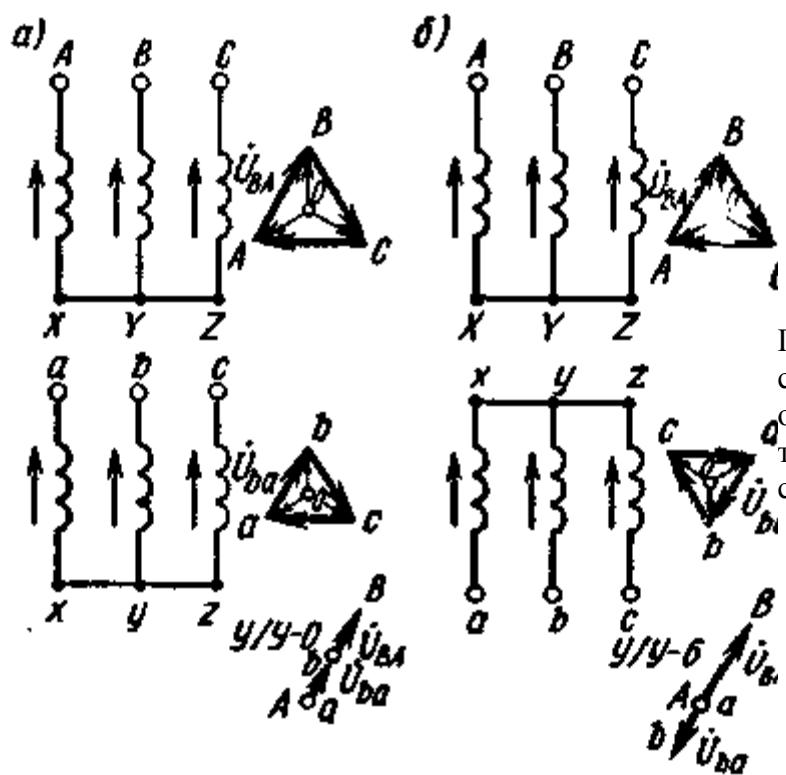


Рис. 2.47.

Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме У/У

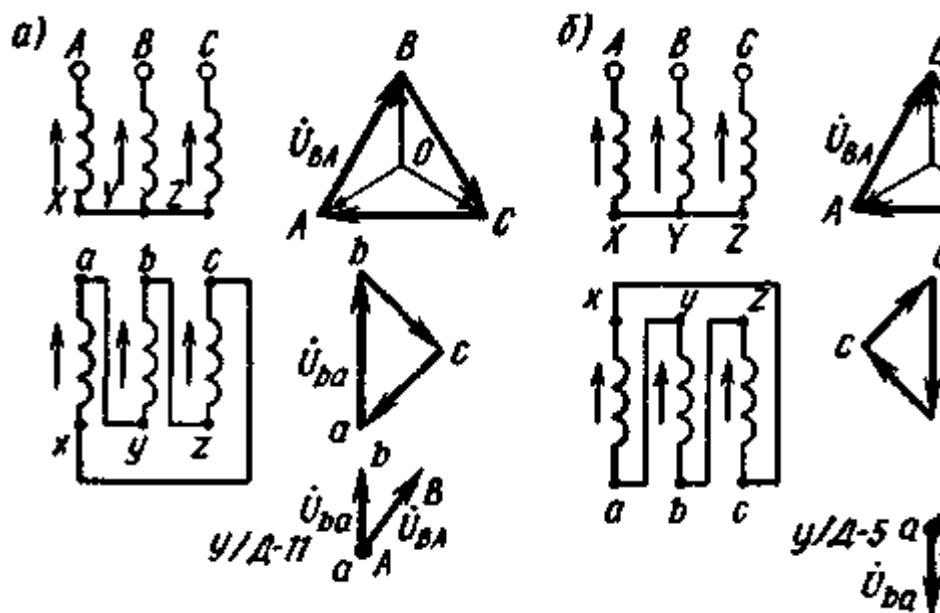
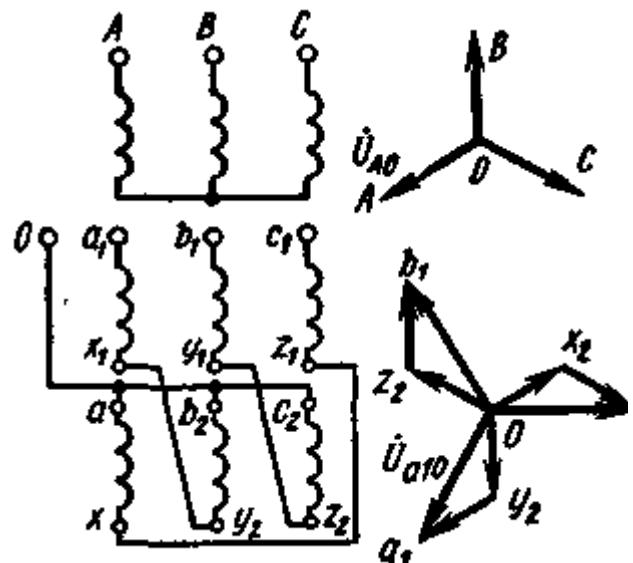


Рис.

2.48. Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме У/Д

При соединении обмотки НН по схеме ZН, а обмотки ВН по схеме У (рис. 2.49) фазные напряжения обмотки НН сдвинуты относительно соответствующих фазных напряжений обмотки ВН (например, \dot{U}_{a10} относительно \dot{U}_{A0}) на угол 330° , т. е. при таком соединении имеем одиннадцатую группу. Это объясняется тем, что между векторами линейных напряжений (не показанных на рис. 2.49) имеется такой же угол.

Рис. 2.49. Группа соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/Zн



2. Режим короткого замыкания трансформатора

Режимом короткого замыкания трансформатора называется такой режим, когда выводы вторичной обмотки замкнуты токопроводом с сопротивлением, равным нулю ($Z\text{H} = 0$). Короткое замыкание трансформатора в условиях эксплуатации создает аварийный режим, так как вторичный ток, а следовательно, и первичный увеличиваются в несколько десятков раз по сравнению с номинальным. Поэтому в цепях с трансформаторами предусматривают защиту, которая при коротком замыкании автоматически отключает трансформатор.



В лабораторных условиях можно провести испытательное короткое замыкание трансформатора, при котором накоротко замыкают зажимы вторичной обмотки, а к первичной подводят такое напряжение U_k , при котором ток в первичной обмотке не превышает номинального значения ($I_k < I_{1\text{ном}}$). При этом выраженное в процентах напряжение U_k , при $I_k = I_{1\text{ном}}$ обозначают u_K и называют напряжением короткого замыкания трансформатора. Это характеристика трансформатора, указываемая в паспорте.

Таким образом (%):

$$u_K = \frac{U_k \cdot 100}{U_{1\text{ном}}}$$

где $U_{1\text{ном}}$ — номинальное первичное напряжение.

Напряжение короткого замыкания зависит от высшего напряжения обмоток трансформатора. Так, например, при высшем напряжении 6—10 кВ $u_K = 5,5\%$, при 35 кВ $u_K = 6,5 \div 7,5\%$, при 110 кВ $u_K = 10,5\%$ и т. д. Как видно, с повышением номинального высшего напряжения увеличивается напряжение короткого замыкания трансформатора.

При напряжении U_k составляющем 5—10% от номинального первичного напряжения, намагничающий ток (ток холостого хода) уменьшается в 10—20 раз или еще более значительно. Поэтому в режиме короткого замыкания считают, что

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$$

Основной магнитный поток Φ также уменьшается в 10—20 раз, и потоки рассеяния обмоток становятся соизмеримыми с основным потоком.

Так как при коротком замыкании вторичной обмотки трансформатора напряжение на ее зажимах $U_2 = 0$, уравнение э. д. с. для нее принимает вид

$$\dot{E}'_2 = R'_2 \cdot \dot{I}'_2 + jX'_2 \cdot \dot{I}'_2$$

а уравнение напряжения для трансформатора записывается как

$$\dot{U}_h = R_h \cdot \dot{I}_1 + jX_h \cdot \dot{I}_1$$

Этому уравнению соответствует схема замещения трансформатора, изображенная на рис. 1.

Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании соответствующая уравнению и схеме рис. 1, показана на рис. 2. Напряжение короткого замыкания имеет активную и реактивную составляющие. Угол фаз между векторами этих напряжений и тока зависит от соотношения между активной и реактивной индуктивной составляющими сопротивления трансформатора.

$$\varphi_K = \arctg \left(\frac{X_K}{R_K} \right)$$

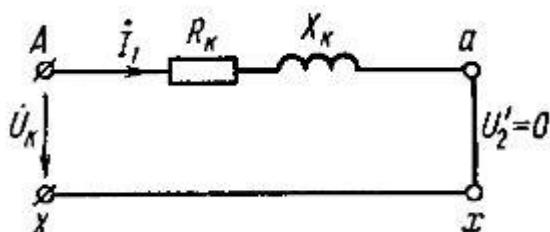


Рис. 1. Схема замещения трансформатора при коротком замыкании

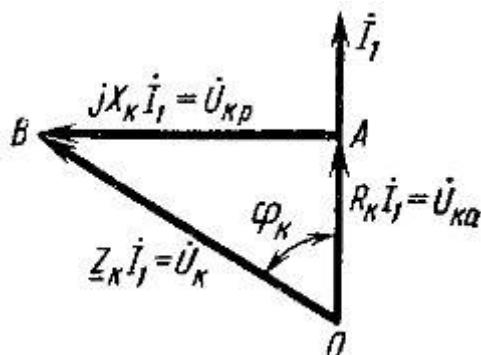


Рис. 2. Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании

У трансформаторов с номинальной мощностью 5—50 кВА $X_K/R_K = 1 \div 2$; с номинальной мощностью 6300 кВА и более $X_K/R_K = 10$ и более. Поэтому считают, что у трансформаторов большой мощности $U_K = U_{Kp}$, а полное сопротивление $Z_K = X_K$.

Опыт короткого замыкания.

Этот опыт, как и опыт холостого хода, проводят для определения параметров трансформатора. Собирают схему (рис. 3), в которой вторичная обмотка замкнута накоротко металлической перемычкой или проводником с сопротивлением, близким к нулю. К первичной обмотке подводится такое напряжение U_K , при котором ток в ней равен номинальному значению I_{1n} .

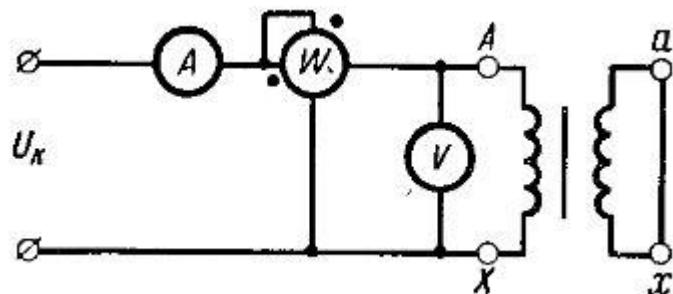


Рис. 3. Схема опыта короткого замыкания трансформатора
По данным измерений определяют следующие параметры трансформатора.

Напряжение короткого замыкания

$$U_K = \frac{U_K \cdot 100}{U_{1\text{ном}}}$$

где U_K — измеренное вольтметром напряжение при $I_1 = I_{1\text{ном}}$. В режиме короткого замыкания U_K очень мало, поэтому потери холостого хода в сотни раз меньше, чем при номинальном напряжении. Таким образом, можно считать, что $P_{\text{ро}} = 0$ и измеряемая ваттметром мощность — это потери мощности $P_{\text{пк}}$, обусловленные активным сопротивлением обмоток трансформатора.

При токе $I_1 = I_{1\text{ном}}$ получают номинальные потери мощности на нагрев обмоток $P_{\text{пк,ном}}$, которые называются электрическими потерями или потерями короткого замыкания.

Из уравнения напряжения для трансформатора, а также из схемы замещения (см. рис. 1) получаем

$$\begin{aligned} U_K &= Z_K \cdot I_1 \\ Z_K &= \sqrt{R_K^2 + X_K^2} \end{aligned}$$

где Z_K — полное сопротивление трансформатора.

Измерив U_K и I_1 можно вычислить полное сопротивление трансформатора

$$Z_K = \frac{U_K}{I_1}$$

Потери мощности при коротком замыкании можно выразить формулой

$$P_{\text{пк}} = I_1^2 \cdot R_K$$

поэтому активное сопротивление обмоток трансформатора

$$R_K = \frac{P_{\text{пк}}}{I_1^2}$$

находят из показаний ваттметра и амперметра. Зная Z_K и R_K , можно вычислить индуктивное сопротивление обмоток:

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}$$

Зная Z_K , R_K и X_K трансформатора, можно построить основной треугольник напряжений короткого замыкания (треугольник ОАВ на рис. 2), а также определить активную и индуктивную составляющие напряжения короткого замыкания:

$$U_{ka} = U_K \cdot \cos \varphi_K$$

$$U_{kp} = U_K \cdot \sin \varphi_K$$

3.3 Механическая характеристика асинхронного двигателя. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Асинхронный конденсаторный двигатель.

1. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Наибольшее значение для оценки свойств асинхронного двигателя имеет механическая характеристика, представляющая собой графическую зависимость частоты

вращения ротора n_2 от вращающего момента M , т. е. $n_2 = f(M)$ или $M = f(n_2)$. Иногда эта зависимость выражается в виде $M = f(s)$ или $M = f(v)$, где $v = n_2/n_1$ - относительная частота вращения. При этом

(4.45)

$$s = (n_1 - n_2)/n_1 = 1 - v.$$

Использование понятий относительной частоты вращения и скольжения придает механической характеристике более общий характер. Для построения механической характеристики можно воспользоваться круговой диаграммой либо формулой

(4.46)

$$M = m_1 U_1^2 R'^2 / \omega_1 s [(R_1 + C_1 R'^2 / s)^2 + (X_1 + C_1 X'^2)^2],$$

получаемой из формулы

$$M = \Delta P_{\text{эл}}^2 / (\omega_1 s) = m_1 I_1^2 R'^2 / \omega_1 s$$

путем подстановки значения тока I_1^2 из схемы замещения (см. рис. 4.16, а):

$$I_1^2 = U_1 / \sqrt{(R_1 + C_1 R'^2 / s)^2 + (X_1 + C_1 X'^2)^2}$$

Для машин мощностью более 10 кВт величина $C_1 \approx 1$ и формула момента приобретает более простой вид:

(4.46а)

$$M = m_1 U_1^2 R'^2 / \omega_1 s [(R_1 + R'^2 / s)^2 + (X_1 + X'^2)^2].$$

Задаваясь значениями s , при известных параметрах двигателя можно определить M и построить искомую механическую характеристику.

Механическая характеристика (рис. 4.21, а и б) имеет максимум момента при частоте вращения $n_2 \approx (0,8 \div 0,9) n_1$; при частоте вращения $n_2 = n_1$ момент вращения $M = 0$, а при $n_2 = 0$ пусковой момент составляет $M_p = (0,3 \div 0,7) M_{\max}$.

Скольжение, при котором момент имеет максимальное значение (критическое скольжение), можно определить из (4.46), взяв производную от момента по скольжению dM/ds и приравнив ее нулю.

Решая уравнение относительно s , получаем критическое скольжение:

(4.47)

$$s_{\text{кр}} = \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X'^2)^2} / R_1.$$

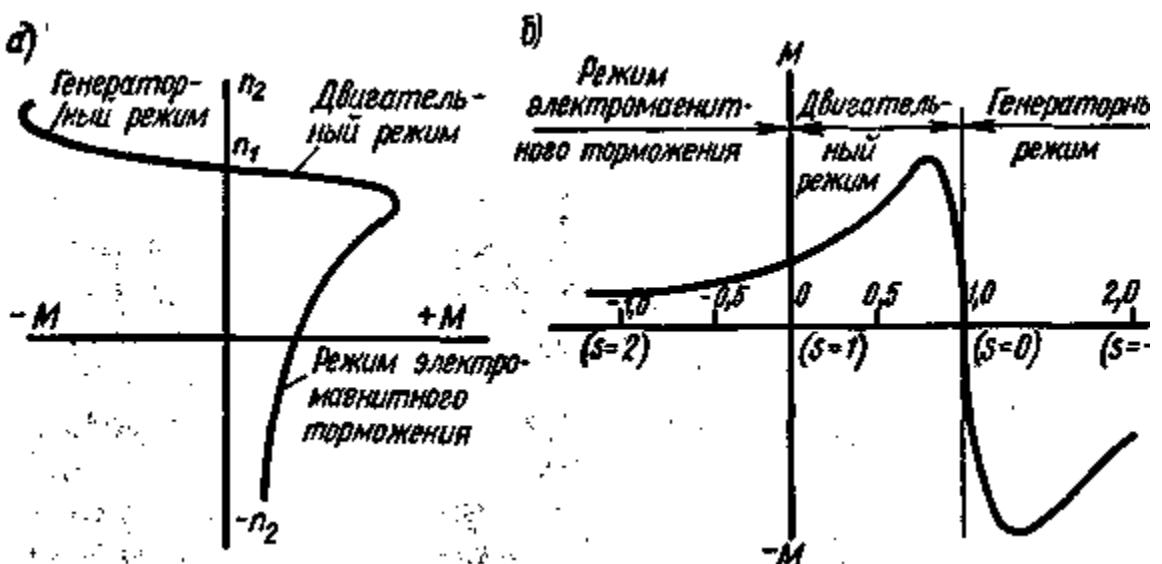


Рис. 4.21. Механическая характеристика асинхронной машины

В первом приближении, принимая $C_1 = 1,0$ и пренебрегая величиной R_1 в знаменателе [так как $R_1 < (X_1 + X'^2)$], имеем

(4.47a)

$$skp = \pm R'2 / (X1 + X'2).$$

Для получения высокого КПД необходимо снижать величину $R2$, вследствие чего максимум момента асинхронного двигателя достигается при относительно высоких частотах вращения. Значение максимального момента получим из (4.46), подставив значение skp из (4.47):

(4.48)

$$M_{max} = \pm mU12 / \{2\omega_1 C1 [\pm R1 + \sqrt{R12 + (X1 + C1 X'2)^2}]\},$$

или, приближенно считая $C1 = 1$ и $R1 = 0$,

(4.48a)

$$M_{max} \approx \pm m1 U12 / [2\omega_1 / (X1 + X'2)].$$

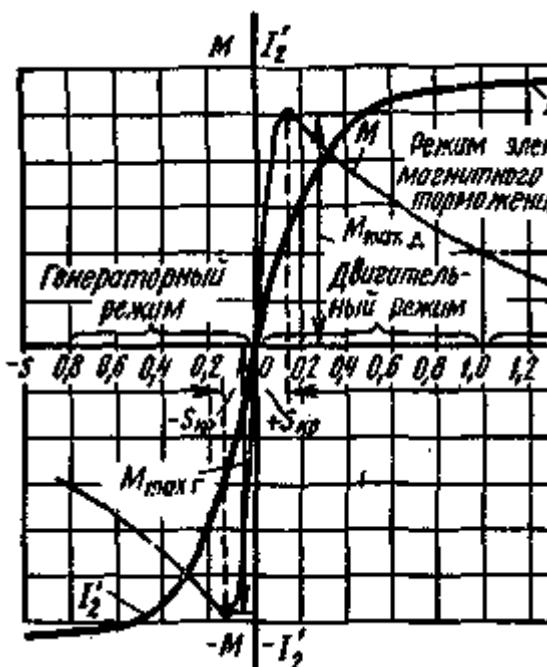


Рис. 4.22. Зависимость электромагнитного момента и тока ротора от скольжения

Знак «+» относится к двигателльному режиму, «-» - к генераторному.

Из уравнения (4.48) и круговой диаграммы видно, что максимальный момент не зависит от активного сопротивления ротора. Это сопротивление определяет лишь скольжение при максимальном моменте.

При увеличении скольжения от $s = 0$ до 1 , как следует из круговой диаграммы, ток ротора $I2'$ монотонно возрастает, в то время как электромагнитный момент M сначала увеличивается с ростом скольжения, достигает максимума при $s = skp$, а затем уменьшается, несмотря на возрастание тока $I2'$ (рис. 4.22).

Физически это объясняется тем, что в формуле момента $M = смФI2 \times \cos \psi_2$ при малых скольжениях преобладающее влияние имеет возрастание тока $I2$. При увеличении скольжения выше skp ток $I2$ возрастает сравнительно мало и преобладающее влияние оказывает уменьшение $\cos \psi_2$, которое происходит вследствие повышения частоты в роторе: $f2 = sf1$.

Построение механической характеристики по каталожным данным. На практике широко используют приближенное аналитическое выражение механической характеристики. Согласно (4.21) и (4.32a) электромагнитный момент асинхронного двигателя

(4.49)

$$M = \Delta P_{el}^2 / (\omega_1 s) = m^2 I^2 R^2 / (\omega_1 s) = m^2 s E^2 R^2 / [\omega_1 (R^2 + s^2 X^2)].$$

Принимая приближенно $E^2 \approx \text{const}$, т. е. считая, что магнитный поток машины при изменении нагрузки не изменяется, и приравнивая нулю производную dM/ds , полученную из формулы (4.49), можно найти критическое скольжение, соответствующее максимальному моменту, $s_{kp} = \pm R^2 / X^2$ и соответственно максимальный момент

(4.50)

$$M_{max} = \pm t^2 E^2 / (2\omega_1 X^2).$$

Разделив выражение (4.49) на (4.50), после преобразования получим

(4.51)

$$M/M_{max} = 2 / (s_{kp} / s + s / s_{kp}).$$

Формула (4.51) является приближенной и, конечно, дает погрешность, так как не учитывает падение напряжения в обмотках статора. Особенно велика погрешность при переходе из двигательного режима в генераторный, где разница в моментах может быть существенной. Однако для исследования одного режима выведенная формула дает приемлемую точность. Это объясняется тем, что в области малых скольжений от $s = 0$ до s_{kp} магнитный поток изменяется незначительно и, следовательно, в этой области формула не может дать большой погрешности, тем более, что точки при $s = 0$ и s_{kp} являются фиксированными.

При скольжениях, близких к единице, формула (4.51), казалось бы, должна давать завышенные значения момента, так как при больших токах сильнее проявляется падение напряжения в статоре. Однако в реальных машинах при скольжениях, близких к единице, уменьшается сопротивление X^2 из-за явления вытеснения тока в проводниках ротора, что ведет к увеличению момента. В результате оказывается, что погрешность, обусловленная пренебрежением падения напряжения в статоре, и погрешность, вызванная изменением параметров ротора, взаимно противоположны, вследствие чего точность приближенной формулы (4.51) достаточна для практических целей.

2. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Асинхронный конденсаторный двигатель.

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

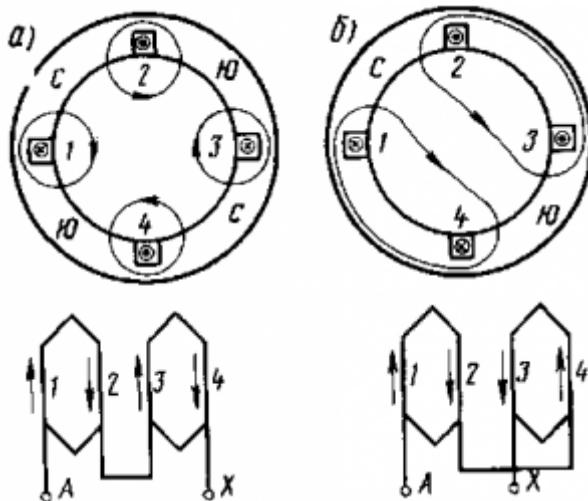


Рис. 266. Схема переключения катушек

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_{vn} 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 (тиристоров) созданы статические преобразователи частоты и построены 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° , 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.

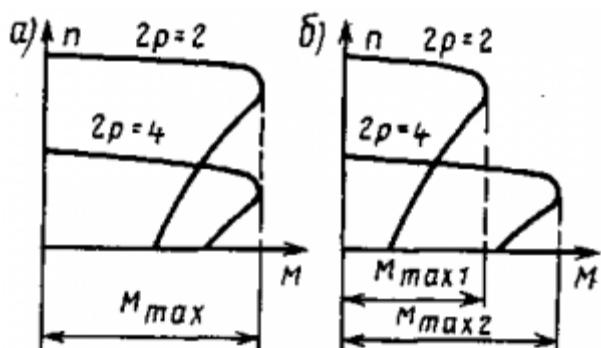


Рис. 267. Механические характеристики двухскоростных асинхронных двигателей с постоянным наибольшим моментом (а) и постоянной мощностью (б)

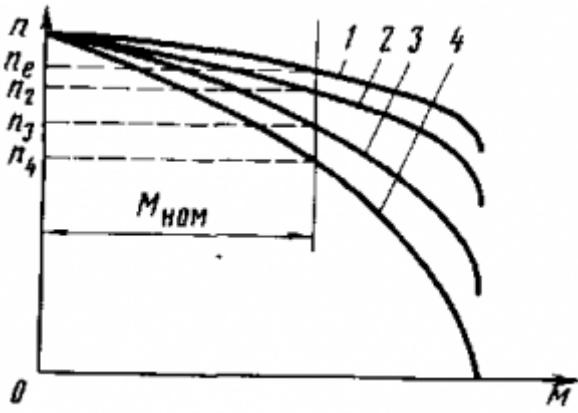


Рис.

268.

Механические

характеристики асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения путем включения реостата в цепь обмотки ротора

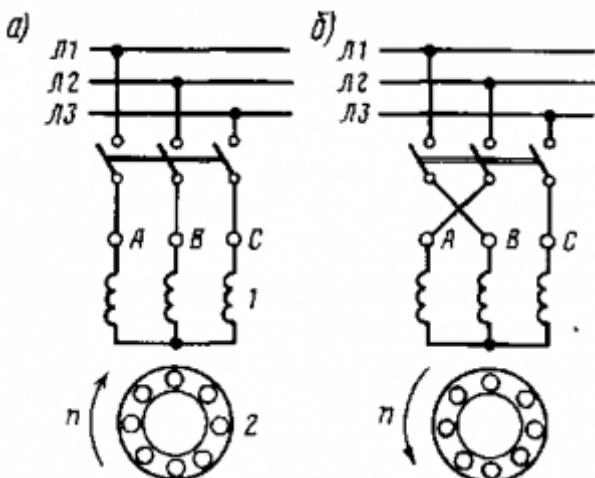


Рис.

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 коротко-замкнутым 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_{p4} , R_{p3} , R_{p2} 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 $R_p = 0$). 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 (проводы). 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. Асинхронный конденсаторный двигатель

Конденсаторные двигатели — разновидность асинхронных двигателей, в обмотки которого включены конденсаторы для создания сдвига фазы тока.[1] Подключаются в однофазную сеть посредством специальных схем. По количеству фаз статора делятся на двухфазные и трехфазные.

Существует разные схемы подключения, больше вариантов для трёхфазных двигателей, различающиеся способом соединения обмоток двигателя и составом дополнительных элементов, но минимальная работоспособная схема содержит один конденсатор, от чего и происходит название.

Как правило, одна из обмоток («фаза двигателя») запитывается напрямую от однофазной сети, а другие обмотки запитываются через электрический конденсатор, который сдвигает фазу подводимого тока почти на $+90^\circ$, или через катушку индуктивности, которая сдвигает фазу почти на -90° . Чтобы результирующее вращающееся магнитное поле не было эллиптическим, последовательно с конденсатором включается переменный проволочный резистор, с помощью которого добиваются кругового вращающегося магнитного поля.

Применение

Питание трёхфазного двигателя от однофазной электрической сети

Промышленные конденсаторные двигатели имеют в основе, как правило, двухфазный двигатель (проще производство и схема подключения). Трёхфазные двигатели переделываются под однофазную сеть обычно в частном порядке или мелкосерийном производстве в силу массовости таких типов двигателей и сетей, выбирая при этом между сложностью схемы и недоиспользованием мощности двигателя.

Такие двигатели используются в основном в бытовой технике малой мощности: советские стиральные машины, двигатели бобинных и стационарных кассетных магнитофонов, недорогих проигрывателях виниловых дисков и другой подобной технике.

Также такие двигатели применяются в циркуляционных насосах водопроводных и отопительных систем (напр. компании Grundfos), и в воздуходувках и дымососах отопительных и водонагревательных агрегатов (напр. Buderus).

Трёхфазные асинхронные двигатели в однофазную электрическую сеть включают через фазосдвигающий конденсатор.

Вывод одной обмотки электродвигателя подключается к «фазовому» проводу, вывод второй обмотки — к нейтральному проводу. Вывод третьей обмотки подключается через конденсатор, ёмкость которого подбирается по формулам, в зависимости от того, как соединены обмотки двигателя — «звездой» или «треугольником».

Если обмотки соединены «звездой», тогда ёмкость «рабочего» конденсатора должна быть

$$C_{RAB.ZVEZDA} = 2800 \frac{I}{U}$$

Если обмотки соединены «треугольником», тогда ёмкость «рабочего» конденсатора должна быть

$$C_{RAB.TREUGOLNIK} = 4800 \frac{I}{U}, \text{ где}$$

I — ток двигателя, ампер;

U — напряжение сети, вольт;

I — рабочий ток двигателя, ампер;
 C — электрическая ёмкость, микрофарад.

При пуске двигателя кнопкой подключается пусковой конденсатор C_{PUSH} , ёмкость которого должна быть в два раза больше ёмкости рабочего. Как только двигатель наберёт нужные обороты, кнопку «Пуск» отпускают.

Переключатель B_2 позволяет изменять направление вращения электродвигателя. Выключатель B_1 отключает электродвигатель.

Используя паспортные данные электродвигателя, можно определить его рабочий ток I по формуле:

$$I = \frac{P}{1,73 U \eta \cos \varphi}, \text{ где}$$

P — электрическая мощность двигателя, Ватт;

U — напряжение сети, вольт;

η — коэффициент полезного действия;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности.

Преимущества

Практически единственный способ реализации асинхронного двигателя в обычной бытовой однофазной сети.

3.4 Синхронный компенсатор. Пуск в ход синхронного двигателя. Работа синхронного генератора параллельно с сетью.

1. Синхронный компенсатор

Синхронный компенсатор представляет собой синхронный двигатель, работающий без нагрузки на валу; при этом по обмотке якоря проходит практически только реактивный ток. Синхронный компенсатор может работать в режиме улучшения $\cos \varphi$ или в режиме стабилизации напряжения.

Обычно электрическая сеть, питающая электроэнергией промышленные предприятия, нагружена током I_n , отстающим по фазе от напряжения сети U_c (рис. 6.55, а). Это объясняется тем, что от сети получают питание асинхронные двигатели, у которых реактивная составляющая тока довольно велика. Для улучшения $\cos \varphi$ сети синхронный компенсатор должен работать в режиме перевозбуждения. При этом ток возбуждения регулируется так, чтобы ток якоря I_a синхронного компенсатора опережал на 90° напряжение сети U_c (рис. 6.55, а) и был примерно равен реактивной составляющей I_n . Токи нагрузки I_n . В результате сеть загружается только активным током нагрузки $I_c = I_n$.

При работе в режиме стабилизации напряжения ток возбуждения синхронного компенсатора устанавливается постоянным, причем такого значения, чтобы ЭДС компенсатора E_0 равнялась номинальному напряжению сети $U_{c,nom}$ (рис. 6.55, б). В сети при этом имеется некоторый ток I_n , создающий падение напряжения $\Delta U \approx I_n R_c \cos \varphi + I_n X_c \sin \varphi$, где R_c и X_c — активное и индуктивное сопротивление сети; φ — угол сдвига фаз между векторами напряжения и тока сети.

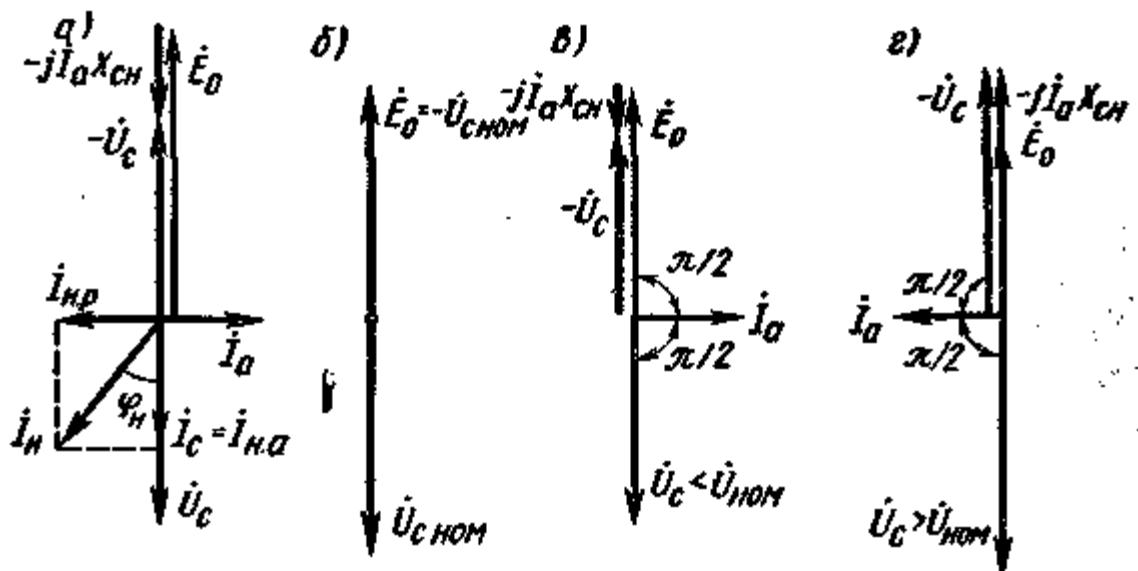


Рис. 6.55. Векторные диаграммы синхронного компенсатора: а — в режиме улучшения $\cos \varphi$ сети; б, в, г — в режиме стабилизации напряжения

Если напряжение сети в точке подключения синхронного компенсатора несколько понижается из-за возрастания тока нагрузки I_n и становится меньше $U_{c,nom}$, то синхронный компенсатор начинает забирать из сети реактивный опережающий ток I_a (рис. 6.55, в). Это уменьшает падение напряжения в ней на величину $\Delta U_k = I_a X_c$. При повышении напряжения в сети, когда $U_c > U_{c,nom}$, синхронный компенсатор загружает сеть реактивным отстающим током I_a (рис. 6.55, г), что приводит к увеличению падения напряжения на величину $\Delta U_k = I_a X_c$. При достаточной мощности синхронного компенсатора колебания напряжения в сети не превышают 0,5—1,0 %. Недостатком указанного метода стабилизации напряжения является то, что синхронный компенсатор загружает линию реактивным током, увеличивая потери в ней.

2. Пуск в ход синхронного двигателя.

Метод асинхронного пуска. Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. Если его подключить к сети переменного тока, когда ротор неподвижен, а по обмотке возбуждения проходит постоянный ток, то за один период изменения тока, электромагнитный момент будет дважды изменять свое направление, т. е. средний момент за период равняется нулю. При этих условиях двигатель не сможет прийти во вращение, так как его ротор, обладающий определенной инерцией, не может быть в течение одного полупериода разогнан до синхронной частоты вращения. Следовательно, для пуска синхронного двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной.

В настоящее время для этой цели применяют метод асинхронного пуска. При этом методе синхронный двигатель пускают как асинхронный, для чего его снабжают специальной коротко-замкнутой пусковой обмоткой, выполненной по типу «беличья клетка». Чтобы увеличить сопротивление стержней, клетку изготавливают из латуни. При включении трехфазной обмотки статора в сеть образуется вращающееся магнитное поле, которое, взаимодействуя с током I_{nv} пусковой обмотке (рис. 6.48, а), создает электромагнитные силы F и увлекает за собой ротор. После разгона ротора до частоты

вращения, близкой к синхронной, постоянный ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает синхронизирующий момент, который втягивает ротор в синхронизм.

Применяют две основные схемы пуска синхронного двигателя. При схеме, изображенной на рис. 6.48, б, обмотку возбуждения сначала замыкают на гасящий резистор, сопротивление которого $R_{доб}$ превышает в 8 — 12 раз активное сопротивление R_b обмотки возбуждения. После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной (при $s \approx 0,05$), обмотку возбуждения отключают от гасящего резистора и подключают к источнику постоянного тока (возбудителю), вследствие чего ротор втягивается в синхронизм. Осуществить пуск двигателя с разомкнутой обмоткой возбуждения нельзя, так как во время разгона ротора при $s > 0$ в ней вращающимся магнитным полем индуцируется ЭДС $E_b = 4,44f_2w_b\Phi_m = 4,4f_1s_wb\Phi_m$, где $f_2 = f_1s$ — частота изменения тока в обмотке возбуждения; w_b — число витков обмотки возбуждения; Φ_m — амплитуда магнитного потока вращающегося поля.

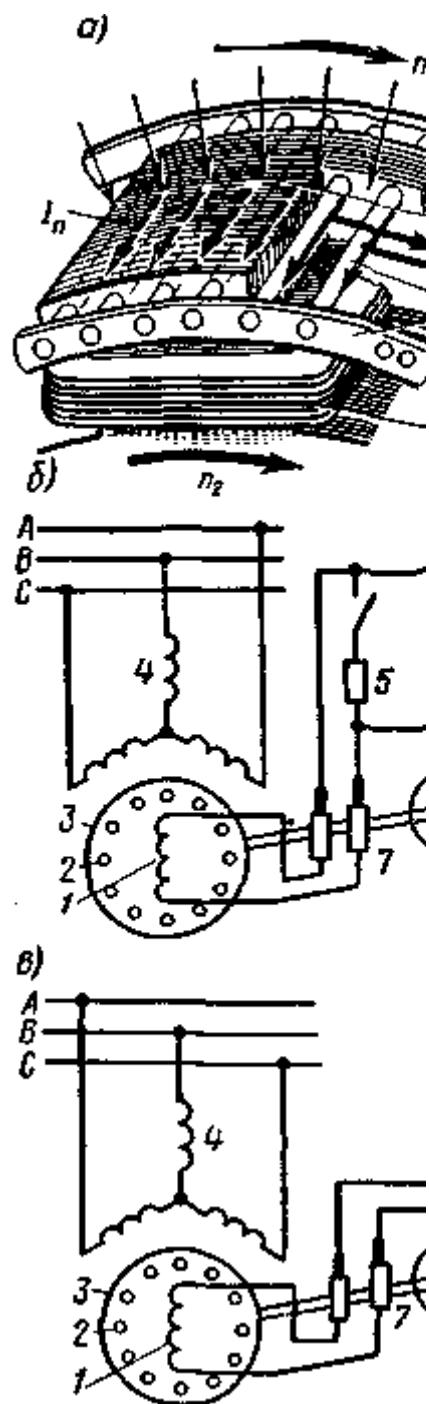


Рис. 6.48. Устройство пусковой обмотки синхронного двигателя (а) и схемы его асинхронного пуска (б и в): 1 - обмотка возбуждения; 2 - пусковая обмотка; 3 - ротор; 4 - обмотка якоря; 5 - гасящее сопротивление; 6 - якорь возбудителя; 7 - кольца и щетки

В начальный момент пуска при $s = 1$ из-за большого числа витков обмотки возбуждения ЭДС Ев может достигать весьма большого значения и вызвать пробой

изоляции. При схеме, изображенной на рис. 6.48, в, обмотка возбуждения постоянно подключена к возбудителю, сопротивление которого по сравнению с сопротивлением R_B весьма мало, поэтому эту обмотку в режиме асинхронного пуска можно считать замкнутой накоротко. С уменьшением скольжения до $s = 0,3 \div 0,4$ возбудитель возбуждается и в обмотку возбуждения подается постоянный ток, обеспечивающий при $s \approx 0,05$ втягивание ротора в синхронизм. Различие пусковых схем обусловлено тем, что не во всех случаях может быть применена более простая схема с постоянно подключенной к возбудителю обмоткой возбуждения (рис. 6.48, в), так как она имеет худшие пусковые характеристики, чем более сложная схема, приведенная на рис. 6.48, б. Главной причиной ухудшения пусковых характеристик является возникновение одноосного эффекта — влияние тока, индуцируемого в обмотке возбуждения при пуске, на характеристику пускового момента.

Одноосный эффект. Для анализа этого явления предположим сначала, что в двигателе отсутствует пусковая обмотка, а обмотка возбуждения замкнута накоротко. В результате при асинхронном пуске двигателя в обмотке возбуждения индуцируется ЭДС с частотой $f_2 = f_1s$ и по обмотке проходит переменный ток, создающий пульсирующее магнитное поле (обмотка возбуждения в этом случае является однофазной обмоткой переменного тока). Пульсирующее магнитное поле можно разложить на две составляющие: прямое и обратное вращающиеся магнитные поля ротора, которые характеризуются потоками Φ_{pr} и Φ_{obr} . Частота вращения каждого из этих полей относительно

$$\text{пр} = \pm 60f_2/p = \pm 60f_1s/p = \pm n_1s \text{ ротора}$$

Относительно статора прямое поле вращается с частотой

(6.46)

$$\text{пр.пр} = n_2 + np = n_1(1 - s) + n_1s = n_1,$$

где $n_2 = n_1(1 - s)$ — частота вращения ротора.

Следовательно, оно вращается синхронно с полем статора; образуемый этим полем с током статора электромагнитный момент M_{pr} изменяется в зависимости от скольжения так же, как и в трехфазном асинхронном двигателе (рис. 6.49, кривая 2). Обратное поле ротора вращается относительно статора с частотой

(6.47)

$$\text{пр.обр} = n_2 - n_1 = n_1(1 - s) - n_1s = n_1(1 - 2s).$$

При частотах вращения ротора $n_2 < 0,5n_1$, т. е. при $s > 0,5$, обратное поле, как видно из формулы (6.47), перемещается относительно статора в сторону, противоположную направлению вращения ротора; при $n_2 = 0,5n_1$, это поле неподвижно относительно статора; при $n_2 > 0,5$ (т. е. при $s < 0,5$) оно перемещается в ту же сторону, что и ротор.

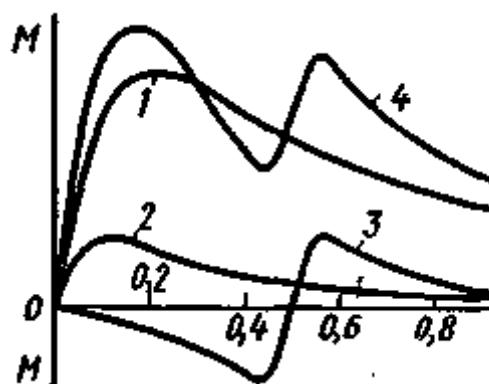


Рис. 6.49. Зависимость

электромагнитного момента от скольжения при асинхронном пуске синхронного двигателя

В обмотке статора обратным полем индуцируется ЭДС с частотой $f_1(1 - 2s)$, для которой обмотка статора является короткозамкнутой. При этом по обмотке статора проходит соответствующий ток. Взаимодействуя с обратным полем ротора, этот ток создает электромагнитный момент $M_{обр}$. Так как направление момента зависит от направления вращения поля пр.обр относительно статора, то из формулы (6.47) следует, что он является знакопеременным и изменение его направления происходит при $s = 0,5$ (рис. 6.49, кривая 3).

Таким образом, ток, индуцируемый в обмотке возбуждения при пуске двигателя, создает электромагнитный момент, который при частоте вращения, меньшей $0,5 n_1$, является ускоряющим, а при большей частоте вращения — тормозящим.

Особенно резко проявляется действие обратного поля при $n \approx 0,5n_1$.

Наличие пусковой обмотки на роторе существенно уменьшает обратное магнитное поле и создаваемый им момент. Однако этот момент, складываясь с асинхронным моментом пусковой обмотки (кривая 1), создает в кривой результирующего пускового момента провал при частоте вращения, равной половине синхронной (кривая 4). Этот провал тем больше, чем больше ток в обмотке возбуждения (см. рис. 6.48, б) на период пуска уменьшает ток в этой обмотке и улучшает форму кривой пускового момента. Следует отметить, что если обмотку возбуждения при пуске не отключить от возбудителя, то по якорю возбудителя в период пуска проходит переменный ток, что может вызвать искрение щеток. Поэтому такую схему пуска применяют в случае небольшого нагружочного момента — не более 50 % от Номинального, при сравнительно небольшой мощности двигателя.

3. Работа синхронного генератора параллельно с сетью.

Особенности работы генератора на сеть большой мощности. 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 ис и генератора и г:

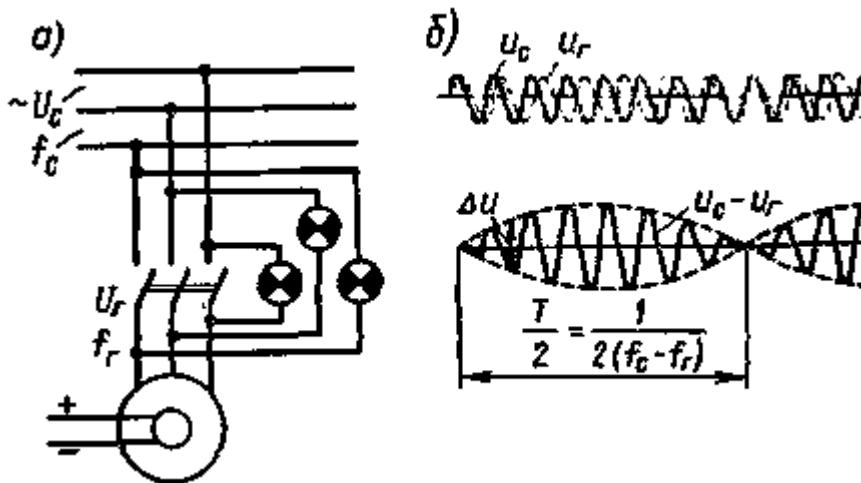
(6.27)

$$U_{cm} \sin(\omega_c t - \alpha_c) = U_{gm} \sin(\omega_g t - \alpha_g).$$

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 — ламповыми и стрелочными синхроноскопами.

Ламповые синхроноскопы 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 Δu изменяется медленно, вследствие чего лампы постепенно загораются и погасают.



Обычно генератор подключают к сети в тот момент, когда разность напряжений Δu 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}_g . 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 синхроноскопов, работающих по принципу врачающегося магнитного поля. В этих приборах при $f_c \neq f_g$ стрелка вращается с частотой, пропорциональной разности частот $f_c - f_g$, в одну или другую сторону в зависимости от того, какая из этих частот больше. При $f_c = f_g$ 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

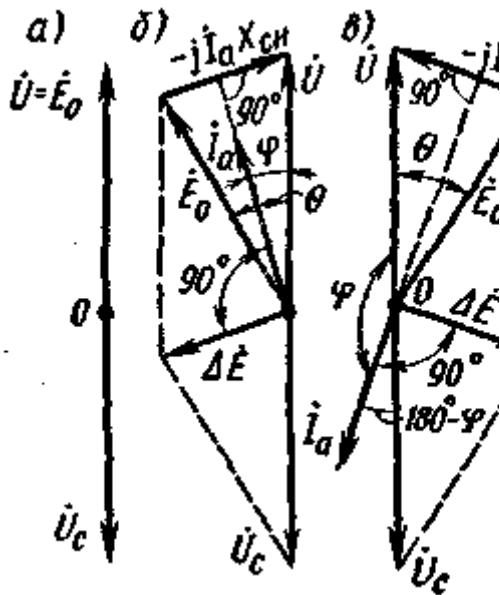


Рис. 6.33. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного генератора при параллельной работе с сетью

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_{nom}.

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. U = -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)

$$I_a = (E_0 - U) / (jX_{ch}) = -j(E_0 - U) / X_{ch}.$$

Так как U = U_c = const, то силу тока I_a можно изменять только двумя способами — изменяя ЭДС E₀ 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 E₀ смещается относительно вектора U на некоторый угол θ в направлении вращения векторов (рис. 6.33, б). При этом возникает некоторая небалансная ЭДС ΔE , приводящая согласно (6.28) к появлению тока I_a. Возникающую небалансную ЭДС $\Delta E = E_0 - U = E_0 + U_c = jI_a X_{ch}$ можно показать на векторной диаграмме (рис. 6.33, б). Вектор тока I_a отстает от вектора ΔE на 90°, поскольку его величина и направление определяются индуктивным сопротивлением X_{ch}.

При работе в рассматриваемом режиме генератор отдает в сеть активную мощность $P = mUIa \cos \phi$ и на вал его действует электромагнитный тормозной момент, который уравновешивает вращающий момент первичного двигателя, вследствие чего частота вращения ротора остается неизменной. Чем больше внешний момент, приложенный к валу генератора, тем больше угол θ , а следовательно, ток и мощность, отдаваемые генератором в сеть.

Если к валу ротора приложить внешний тормозной момент, то вектор E_0 будет отставать от вектора напряжения U на угол θ (рис. 6.33, в). При этом возникают небалансная ЭДС ΔE и ток I_a , вектор которого отстает от вектора ΔE на 90° . Так как угол $\phi > 90^\circ$, активная составляющая тока находится в противофазе с напряжением генератора. Следовательно, в рассматриваемом режиме активная мощность $P = mUIa \cos \phi$ забирается из сети, и машина работает двигателем, создавая электромагнитный вращающий момент, который уравновешивает 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 $\Delta E = -jI_a X_{sn}$ и по обмотке якоря будет проходить ток I_a , который согласно (6.28) определяется только индуктивным сопротивлением X_{sn} машины. Следовательно, ток I_a реактивный: он отстает по фазе от напряжения U на 90° или опережает на тот же угол напряжение сети U_c . При уменьшении тока возбуждения ток I_a изменяет свое направление: он опережает на 90° напряжение U (рис. 6.34, в) и отстает на 90° от напряжения 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 $I_{b,p}$, при

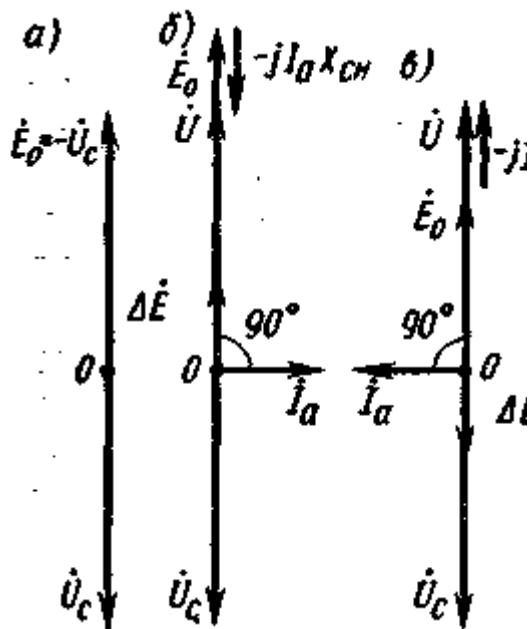


Рис. 6.34. Упрощенные векторные диаграммы неявнополюсного синхронного генератора при параллельной работе с сетью и отсутствии активной нагрузки

котором реактивная составляющая тока I_a равна нулю, называют режимом полного или нормального возбуждения. Если ток возбуждения I_v больше тока $I_{v.p}$, 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_v меньше тока $I_{v.p}$, 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, $\Sigma\Phi = \Phi_{рез} + \Phi_\sigma = \Phi_v + \Phi_a + \Phi_\sigma$ не зависит от тока возбуждения и при всех условиях остается неизменным, так как

(6.29)

$$U = E_0 + E_a + E_\sigma = -U_c = \text{const.}$$

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

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАНЯТИЯМ

4.1 Практическое занятие №1 (ПЗ-1)

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа силовых приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

4.2 Практическое занятие №2 (ПЗ-2)

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа силовых приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

4.3 Практическое занятие №3 (ПЗ-3)

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа силовых приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

4.4 Практическое занятие №4 (ПЗ-4)

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа силовых приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

4.5 Практическое занятие №5 (ПЗ-5)

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа силовых приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

4.6 Практическое занятие №6 (ПЗ-6)

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа силовых приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

4.7 Практическое занятие №7 (ПЗ-7)

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа силовых приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.

4.8 Практическое занятие №8 (ПЗ-8)

При подготовке к практическому занятию подробно ознакомиться с материалом лекции по данной теме, проработать материал по основной и, при необходимости, по дополнительной литературе. При рассмотрении вопроса уяснить принцип работы представленного типа силовых приборов и устройств на их основе, основные параметры и характеристики. Быть готовым ответить на вопросы преподавателя.