

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

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

Б1.В.06 Электротехника и электроника

Направление подготовки 35.03.06 Агроинженерия

Профиль образовательной программы Технические сервис в АПК

Форма обучения заочная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Организация самостоятельной работы	3
2. Методические рекомендации по выполнению индивидуальных домашних заданий.....	4
<i>2.1 Электрические цепи переменного тока с последовательным включением элементов.....</i>	<i>4</i>
<i>2.2 Электрические цепи переменного тока со смешанным включением элементов.....</i>	<i>12</i>
<i>2.3 Трехфазные электрические цепи переменного тока.....</i>	<i>22</i>
3. Методические рекомендации по самостоятельному изучению вопросов.....	39
<i>3.1 Расчет простых цепей постоянного тока</i>	<i>39</i>
<i>3.2 Расчет магнитных цепей.....</i>	<i>40</i>
<i>3.3 Компенсация реактивной мощности.....</i>	<i>41</i>
<i>3.4 . Синхронные машины. Машины постоянного тока</i>	<i>44</i>
<i>3.5 Электронные генераторы</i>	<i>46</i>
<i>3.6 Электронные ключи. Электронные реле</i>	<i>48</i>
<i>3.7 Электроизмерения.....</i>	<i>52</i>
4. Методические рекомендации по подготовке к занятиям	62
4.1 Лабораторное занятие №1 «Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока»	62
4.2 Лабораторное занятие №2 «Исследование цепи переменного тока с последовательным включением элементов	62
4.3 Лабораторное занятие №3 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при при соединении потребителей звездой	62
4.4 Лабораторное занятие №4 «Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему».....	63

1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1.1. Организационно-методические данные дисциплины

№ п. п.	Наименование темы	Общий объем часов по видам самостоятельной работы				
		подг отов ка курс овог о прое кта (раб оты)	подг отов ка рефе рата /эссе	инди видуал ьные дома шние задан ия (ИДЗ)	само стоя тель ное изуч ение вопр осов (СИ В)	подгот овка к заняти ям (ПкЗ)
1	2	3	4	5	6	7
1	Тема 1 Расчет простых цепей при последовательном, параллельном и смешанном включении элементов. Законы Кирхгофа.		x		10	
2	Тема 2 Методы расчета сложных электрических цепей постоянного тока.		x			3
3	Тема 3 Электромагнетизм.				10	
4	Тема 4 Цепи однофазного переменного тока		x	5		3
5	Тема 5 Цепи трехфазного переменного тока		x	5	10	3
6	Тема 6 Трансформаторы.		x		7	2
7	Тема 7 Асинхронные машины переменного тока. Синхронные машины. Машины постоянного тока		x			
8	Тема 8 Основы электропривода.		x			
9	Тема 9 Полупроводниковые приборы.		x		20	
10	Тема 10 Микропроцессоры.		x		20	
11	Тема 11 Электроизмерения			10	13	

2. Методические рекомендации по выполнению индивидуальных домашних заданий

Индивидуальные домашние задания выполняются в форме контрольной работы.

2.1 Темы индивидуальных домашних заданий:

1. Электрические цепи переменного тока с последовательным включением элементов

2. Электрические цепи переменного тока со смешанным включением элементов

3. Трехфазные электрические цепи переменного тока

2.2 Содержание индивидуальных домашних заданий

Для электрической цепи переменного тока частотой 50 Гц, соответствующей номеру варианта (таблица 1) и изображенной на рис. 1.1 – 1.10, определить следующее:

1. Полную, активную, реактивную мощность всей цепи и коэффициент мощности всей цепи.
2. Показания всех измерительных приборов, изображенных на схеме.

2.3 Порядок выполнения заданий

2.3.1 Задача 1. Электрические цепи переменного тока с последовательным включением элементов

Таблица 1

Варианты задачи

Ва. р. №	Рис. №	U, В	R ₁	R ₂	R ₃	L ₁	L ₂	L ₃	C ₁	C ₂	C ₃
			Ом			мГн			мкФ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.1	110	30	-	-	44	53	81	50	100	-
2	1.2	120	40	-	-	56	72	-	300	200	80
3	1.3	140	35	25	-	60	86	58	180	-	-
4	1.4	150	23	41	-	108	94	-	250	320	-
5	1.5	160	19	37	-	83	-	-	150	180	70
6	1.6	170	22	38	26	98	80	-	260	-	-
7	1.7	180	14	28	22	50	-	-	80	90	-

8	1.8	210	72	-	-	64	56	76	320	170	-
9	1.9	220	50	-	-	58	93	-	70	130	180
10	1.10	240	78	45	-	96	87	75	280	-	-
11	1.1	100	25	-	-	40	50	72	75	150	-
12	1.2	130	50	-	-	60	80	-	250	280	100
13	1.3	190	45	30	-	75	93	62	210	-	-
14	1.4	200	38	55	-	156	80	-	300	380	-
15	1.5	230	28	42	-	120	-	-	210	160	65
16	1.6	250	32	28	45	185	68	-	270	-	-
17	1.7	260	18	36	54	75	-	-	100	120	-
18	1.8	270	95	-	-	81	63	77	350	150	-
19	1.9	280	70	-	-	62	80	-	200	160	270
20	1.10	290	95	53	-	128	76	54	250	-	-
21	1.1	300	86	-	-	136	85	94	83	110	-
22	1.2	100	45	-	-	76	57	-	120	230	180
23	1.3	110	54	25	-	68	35	80	160	-	-
24	1.4	120	62	32	-	115	44	-	180	260	-
25	1.5	130	75	25	-	73	-	-	130	140	210
26	1.6	140	48	37	52	85	41	-	230	-	-
27	1.7	150	36	17	28	62	-	-	85	140	-
28	1.8	160	91	-	-	75	68	57	280	150	-
29	1.9	170	42	-	-	65	74	-	85	170	120
30	1.10	180	66	72	-	120	35	68	260	-	-
31	1.1	190	38	-	-	48	54	75	75	130	-
32	1.2	200	73	-	-	125	72	-	270	160	80
33	1.3	210	84	33	-	85	65	52	170	-	-
34	1.4	220	46	27	-	95	78	-	210	240	-
35	1.5	230	57	35	-	78	-	-	160	220	140
36	1.6	240	63	28	35	135	32	-	240	-	-
37	1.7	250	45	20	38	110	-	-	100	80	-
38	1.8	260	59	-	-	56	64	35	300	210	-
39	1.9	270	78	-	-	61	48	-	90	180	70
40	1.10	280	36	55	-	35	82	44	250	-	-

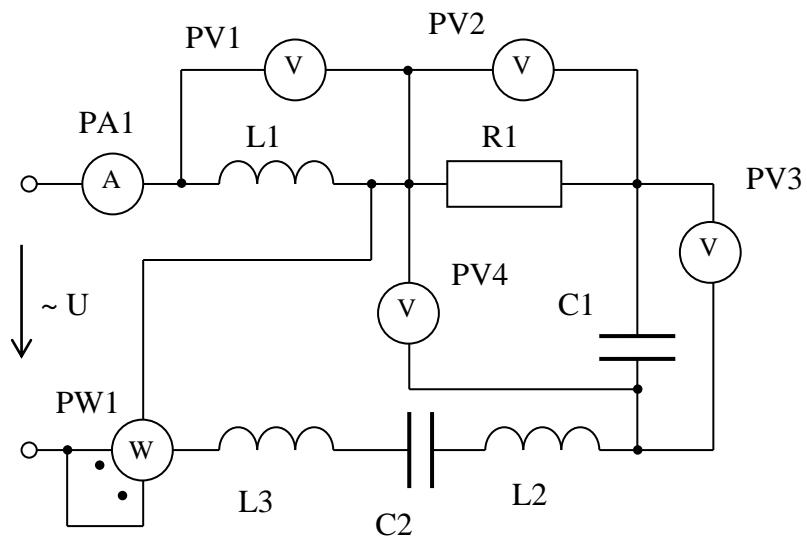


Рис. 1.1

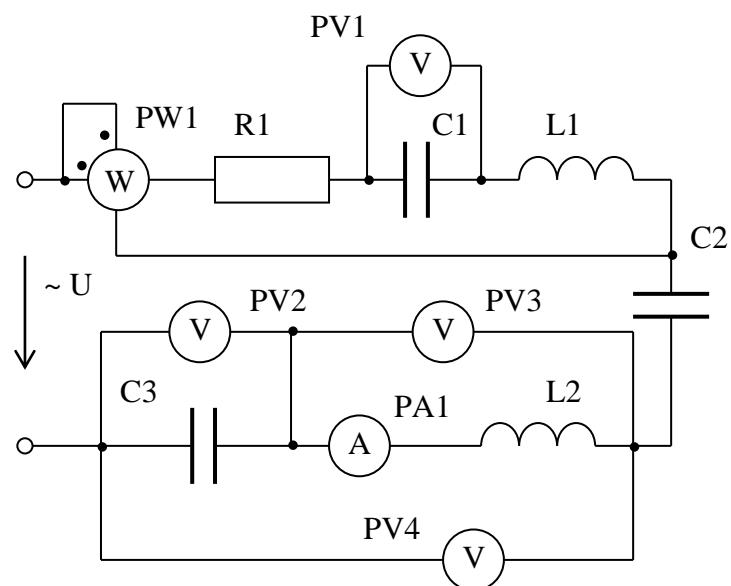


Рис. 1.2

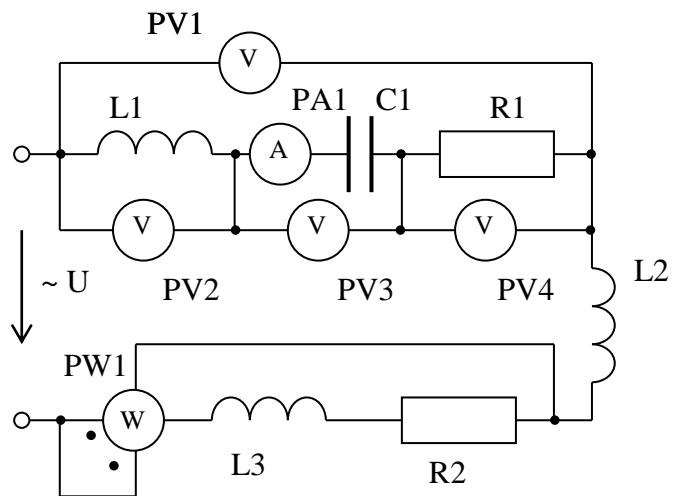


Рис. 1.3

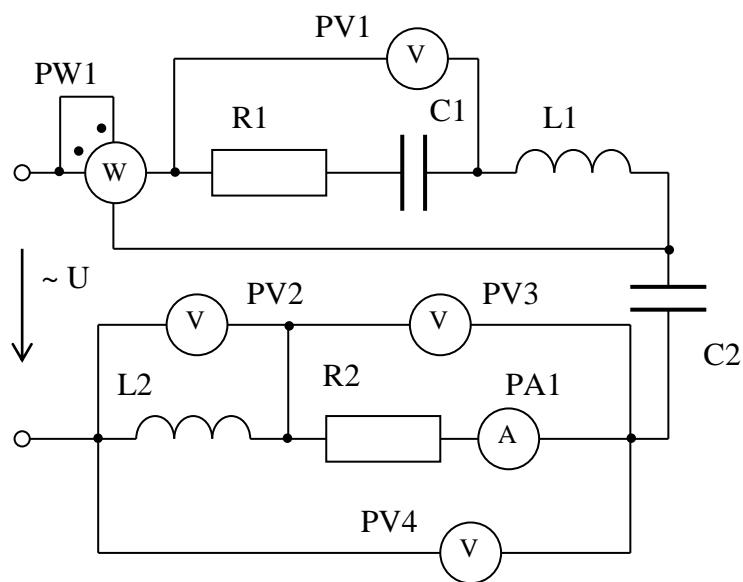


Рис. 1.4

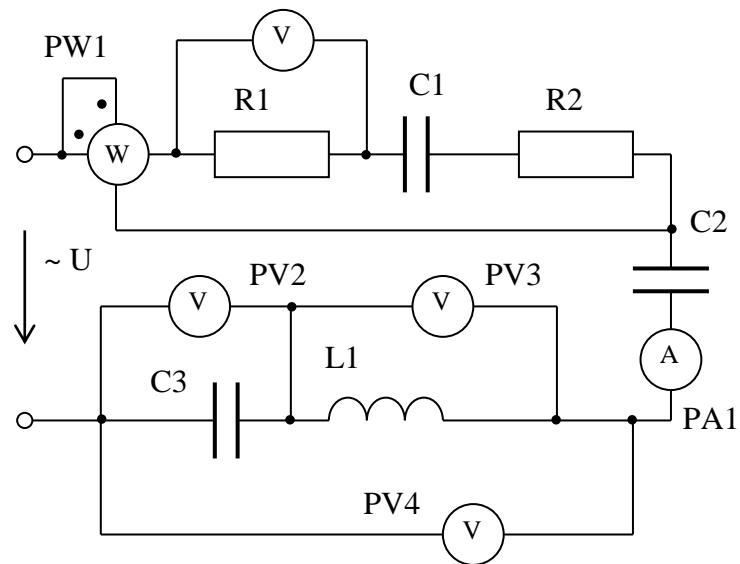


Рис. 1.5

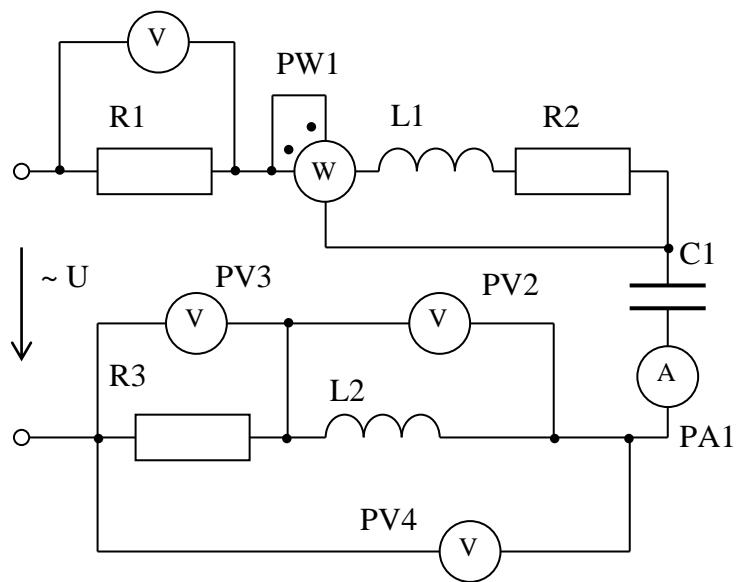


Рис. 1.6

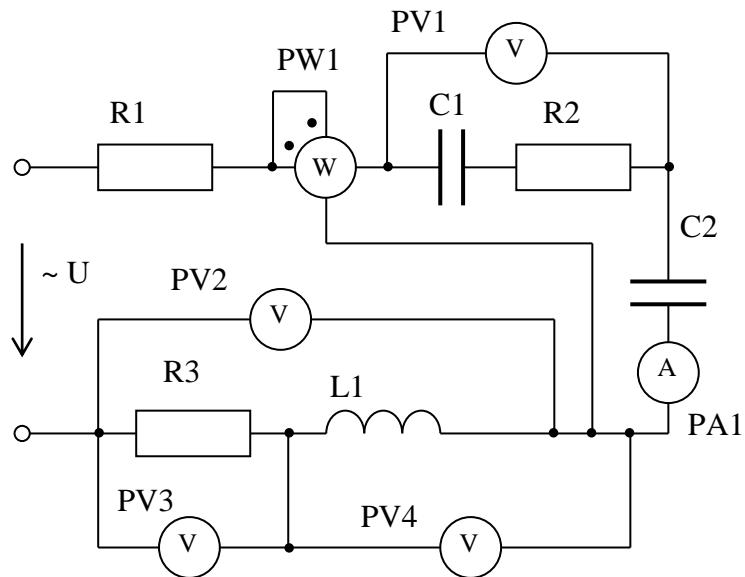


Рис. 1.7

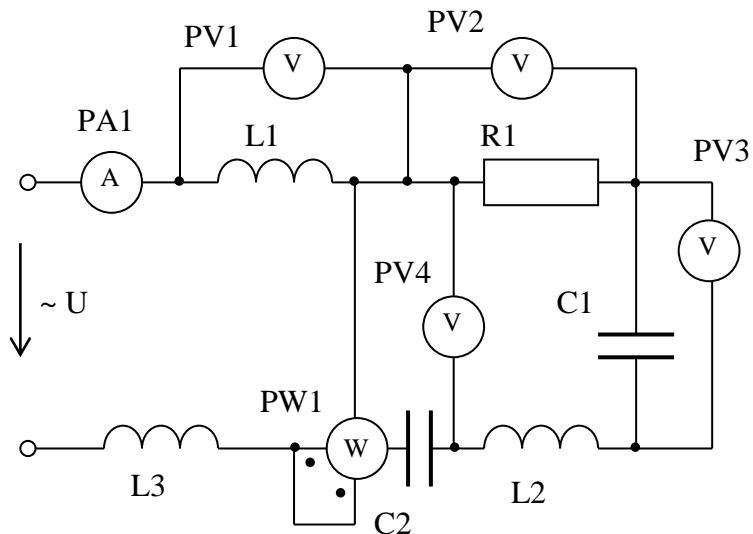


Рис. 1.8

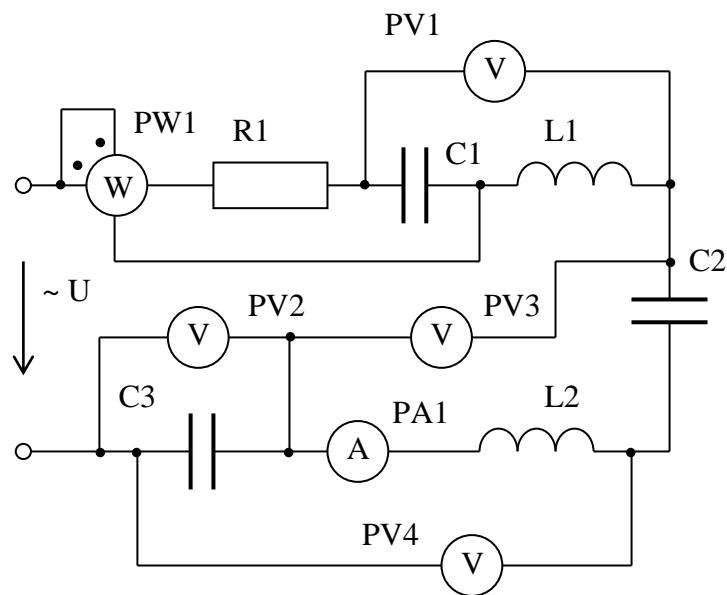


Рис. 1.9

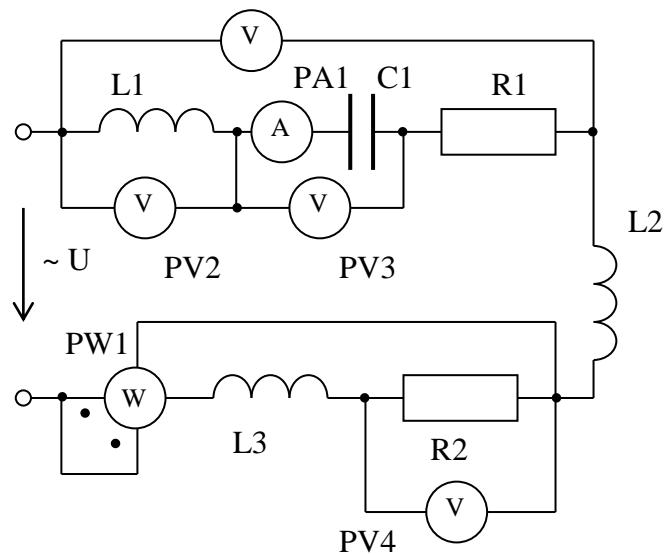


Рис. 1.10

2.4.1 Пример выполнения задачи 1 по расчету электрической цепи переменного тока с последовательным включением элементов

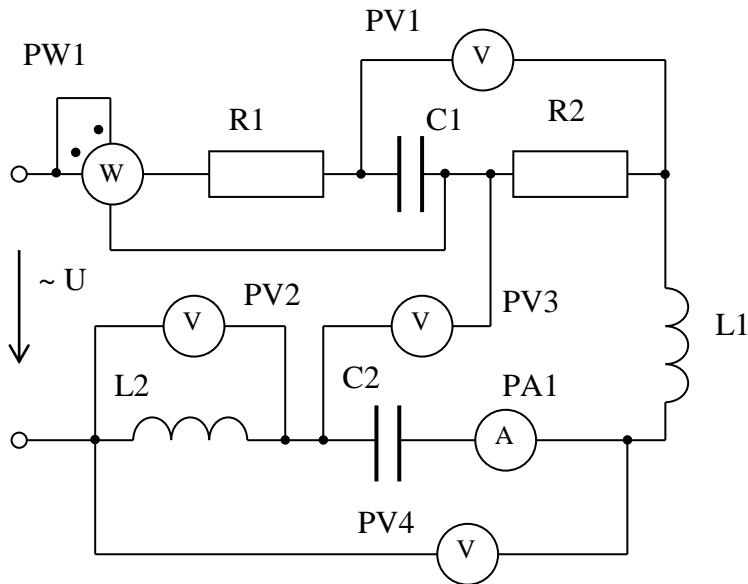


Рис. 1.11

На рисунке 1.11 изображена схема электрической цепи, параметры которой следующие:

$$U=200 \text{ В}, f=50 \text{ Гц}, R_1=18 \text{ Ом}, R_2=52 \text{ Ом},$$

$$L_1=180 \text{ мГн}, L_2=40 \text{ мГн}, C_1=300 \text{ мкФ}, C_2=150 \text{ мкФ}.$$

Определить полную, активную, реактивную мощность всей цепи, коэффициент мощности цепи и показания всех измерительных приборов, изображенных на схеме.

Решение:

Определяем круговую частоту переменного тока

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}.$$

Рассчитываем сопротивления реактивных элементов цепи

$$X_{L_1} = \omega L_1 = 314 \cdot 180 \cdot 10^{-3} = 56,5 \text{ Ом}$$

$$X_{L_2} = \omega L_2 = 314 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 12,6 \text{ Ом}$$

$$X_{C_1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{314 \cdot 300 \cdot 10^{-6}} = 10,6 \text{ Ом}$$

$$X_{C_2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} = 21,2 \text{ Ом}.$$

Определяем общее активное сопротивление всей цепи

$$R_{\text{об}} = R_1 + R_2 = 18 + 52 = 70 \text{ Ом}.$$

Определяем общее реактивное сопротивление всей цепи

$$X_{o\delta} = X_{L1} + X_{L2} - X_{C1} - X_{C2} = \\ = 56,5 + 12,6 - 10,6 - 21,2 = 37 \text{ Ом.}$$

Рассчитываем полное сопротивление всей цепи

$$Z_{o\delta} = \sqrt{R_{o\delta}^2 + X_{o\delta}^2} = \sqrt{70^2 + 37^2} = 79 \text{ Ом.}$$

Определяем силу тока цепи (показание амперметра РА1)

$$I = \frac{U}{Z_{o\delta}} = \frac{200}{79} = 2,52 \text{ А.}$$

Определяем полную мощность всей цепи

$$S = UI = 200 \cdot 2,52 = 505 \text{ ВА.}$$

Определяем коэффициент мощности всей цепи

$$\cos\varphi = \frac{R_{o\delta}}{Z_{o\delta}} = \frac{70}{79} = 0,88.$$

Определяем активную мощность всей цепи

$$P = S \cos\varphi = 505 \cdot 0,88 = 445 \text{ Вт.}$$

Определяем реактивную мощность всей цепи

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{505^2 - 445^2} = 237 \text{ вар.}$$

Рассчитываем показания вольтметров, изображенных на схеме. Для этого определяем полные сопротивления участков цепи, параллельно которым включены вольтметры

$$Z_1 = \sqrt{R_2^2 + X_{C1}^2} = \sqrt{18^2 + 10,6^2} = 20,9 \text{ Ом} \\ Z_2 = X_{L2} = 12,6 \text{ Ом} \\ Z_3 = \sqrt{R_2^2 + (X_{L1} - X_{C2})^2} = \sqrt{52^2 + (56,5 - 21,2)^2} = 62,8 \text{ Ом} \\ Z_4 = \sqrt{(X_{L2} - X_{C2})^2} = \sqrt{(12,6 - 21,2)^2} = 8,7 \text{ Ом.}$$

Показания вольтметров определяем по закону Ома для участка цепи

$$U_1 = IZ_1 = 2,52 \cdot 20,9 = 53 \text{ В}$$

$$U_2 = IZ_2 = 2,52 \cdot 12,6 = 32 \text{ В}$$

$$U_3 = IZ_3 = 2,52 \cdot 62,8 = 159 \text{ В}$$

$$U_4 = IZ_4 = 2,52 \cdot 8,7 = 22 \text{ В.}$$

Определяем показания ваттметра

$$P_1 = I^2 R_1 = 2,52^2 \cdot 18 = 114 \text{ Вт.}$$

2.3.2 Задача 2. Электрические цепи переменного тока со смешанным включением элементов

Задание. Для электрической цепи переменного тока частотой 50 Гц, соответствующей номеру варианта (таблица 2) и изображенной на рис. 2.1 – 2.10, определить следующее:

1. Силу тока во всех ветвях цепи и напряжения на отдельных участках.
2. Показания всех измерительных приборов, изображенных на схеме.

Таблица 2 **Варианты задачи**

Ва р. №	Ри с. №	U, В	R ₁	R ₂	R ₃	L ₁	L ₂	L ₃	C ₁	C ₂	C ₃
			Ом			мГн			мкФ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2.1	110	20	30	-	-	50	-	300	-	100
2	2.2	120	40	50	55	80	-	30	-	40	-
3	2.3	130	30	-	25	70	-	50	-	90	-
4	2.4	140	-	25	45	-	80	-	120	-	180
5	2.5	150	-	80	40	-	60	90	370	-	-
6	2.6	160	30	88	60	-	70	95	-	-	-
7	2.7	170	55	-	50	140	75	80	-	-	-
8	2.8	180	70	40	75	-	60	-	50	-	-
9	2.9	190	95	85	75	170	80	90	-	-	-
10	2.1 0	200	-	70	85	120	90	60	-	-	-
11	2.2	125	45	55	60	85	-	35	-	45	-
12	2.1	115	25	35	-	-	55	-	320	-	110
13	2.4	145	-	30	45	-	85	-	130	-	190
14	2.3	135	35	-	30	95	-	55	-	95	-
15	2.6	165	35	98	65	-	75	85	-	-	-
16	2.5	155	-	85	50	-	65	95	480	-	-
17	2.8	185	75	45	80	-	65	-	55	-	-
18	2.7	175	65	-	55	150	80	85	-	-	-
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
19	2.1 0	205	-	75	95	130	85	65	-	-	-
20	2.9	195	90	80	70	190	85	95	-	-	-
21	2.1 0	200	-	70	85	120	90	60	-	-	-
22	2.9	190	95	85	75	170	80	90	-	-	-
23	2.8	180	70	40	75	-	60	-	50	-	-
24	2.7	170	55	-	50	140	75	80	-	-	-
25	2.6	160	30	88	60	-	70	95	-	-	-
26	2.5	150	-	80	40	-	60	90	370	-	-

27	2.4	140	-	25	45	-	80	-	120	-	180
28	2.3	130	30	-	25	70	-	50	-	90	-
29	2.2	120	40	50	55	80	-	30	-	40	-
30	2.1	110	20	30	-	-	50	-	300	-	100
31	2.9	195	90	80	70	190	85	95	-	-	-
32	2.1 0	205	-	75	95	130	85	65	-	-	-
33	2.7	175	65	-	55	150	80	85	-	-	-
34	2.8	185	75	45	80	-	65	-	55	-	-
35	2.6	165	35	98	65	-	75	85	-	-	-
36	2.5	155	-	85	50	-	65	95	480	-	-
37	2.3	135	35	-	30	95	-	55	-	95	-
38	2.4	145	-	30	45	-	85	-	130	-	190
39	2.1	115	25	35	-	-	55	-	320	-	110
40	2.2	125	45	55	60	85	-	35	-	45	-

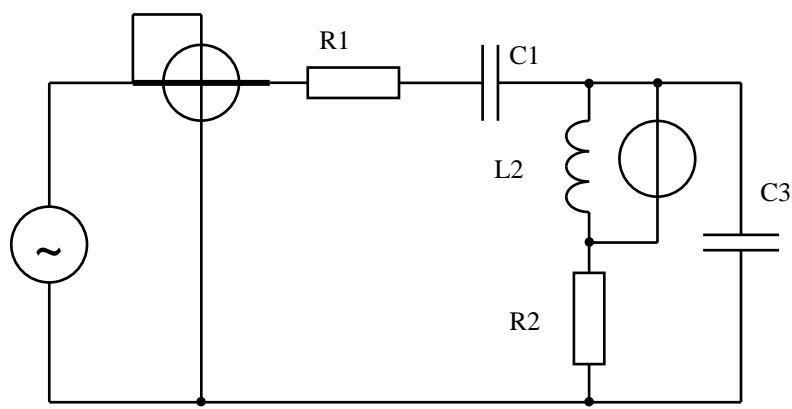


Рис. 2.1

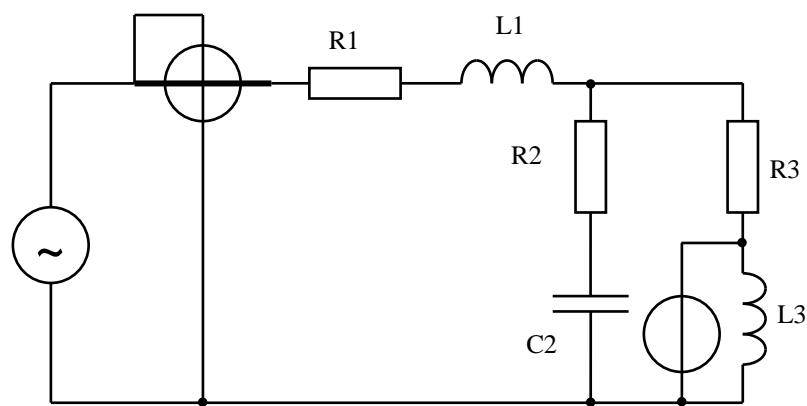


Рис. 2.2

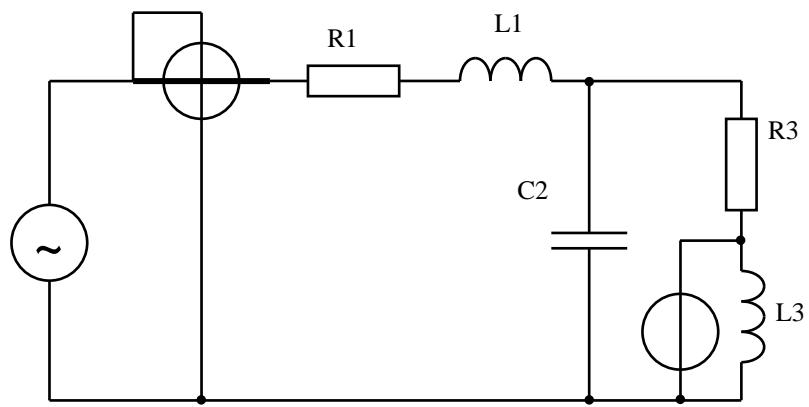


Рис. 2.3

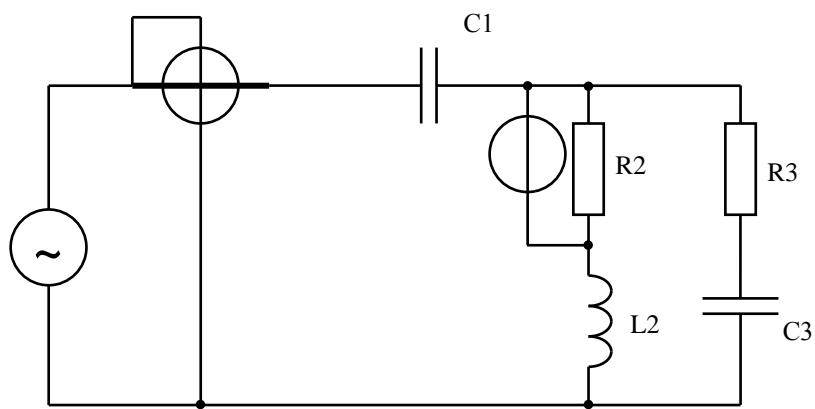


Рис. 2.4

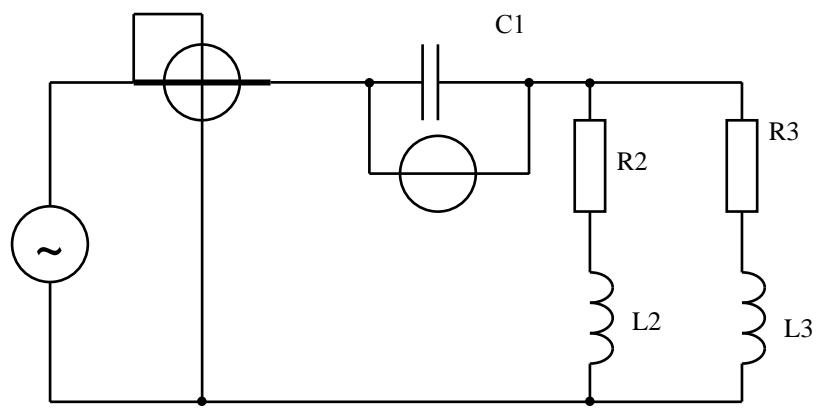


Рис. 2.5

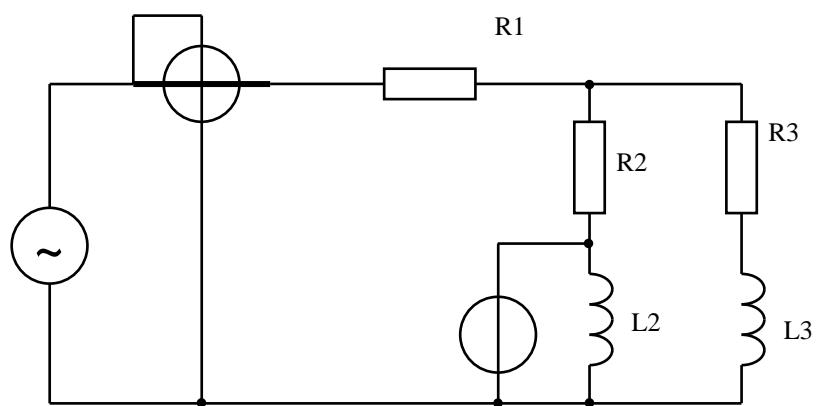


Рис. 2.6

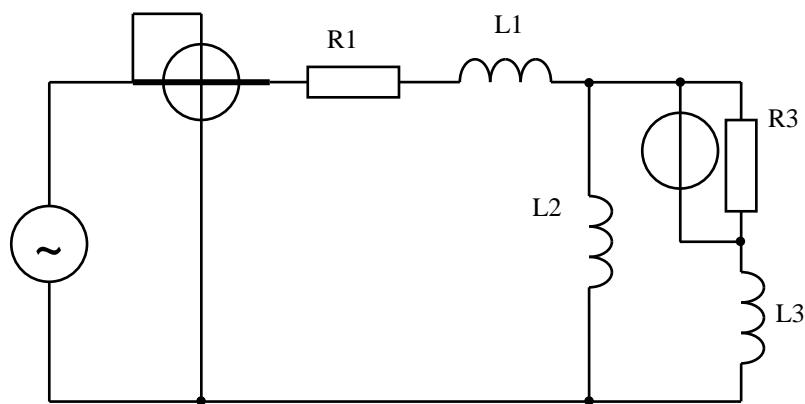


Рис. 2.7

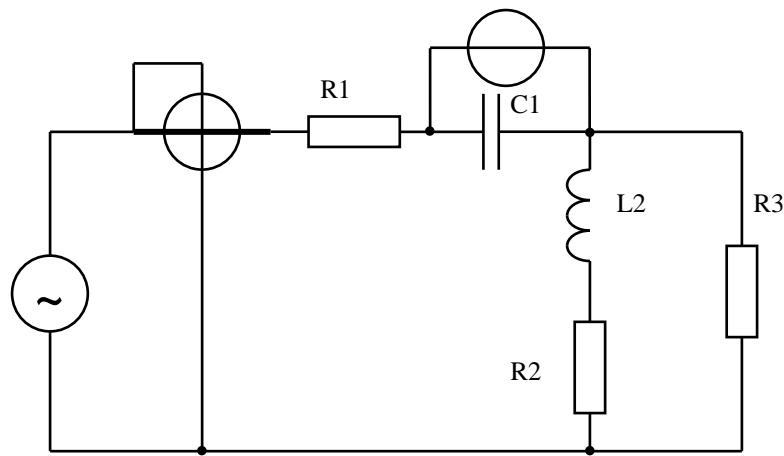


Рис. 2.8

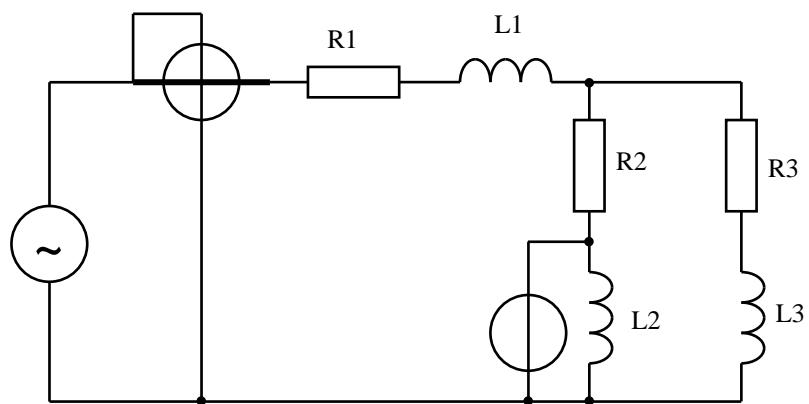


Рис. 2.9

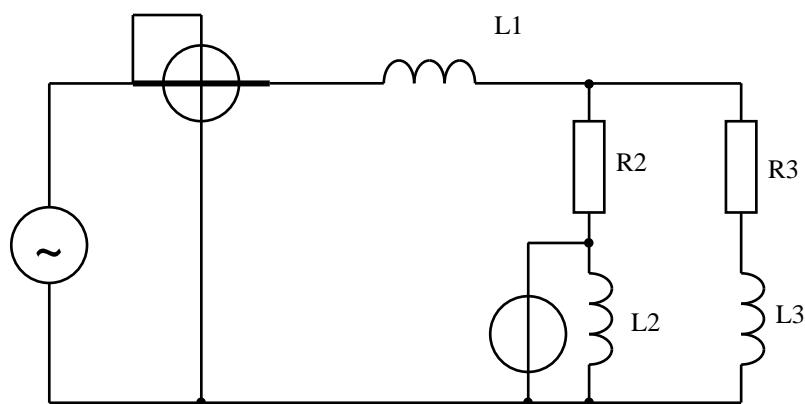


Рис. 2.10

2.4.2 Пример выполнения задачи 2 по расчету электрической цепи переменного тока со смешанным включением элементов

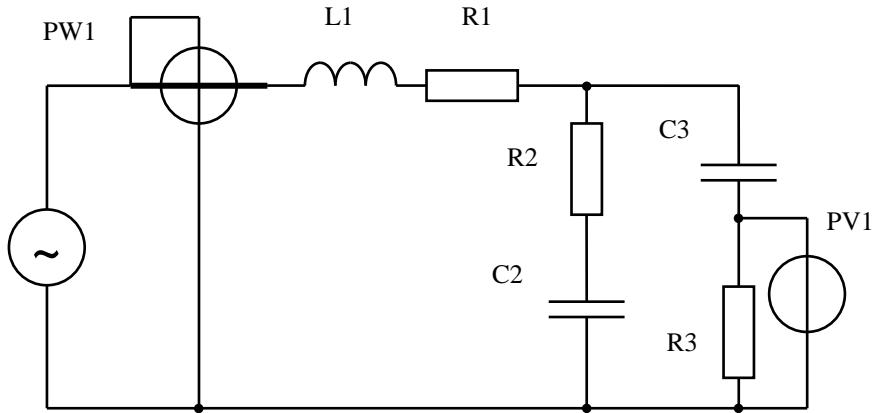


Рис. 2.11

На рисунке 2.11 изображена схема электрической цепи, параметры которой следующие:

$$U=220 \text{ В}, f=50 \text{ Гц}, R_1=78 \text{ Ом}, R_2=43 \text{ Ом}, R_3=61 \text{ Ом},$$

$$L_1=180 \text{ мГн}, C_2=40 \text{ мкФ}, C_3=58 \text{ мкФ}.$$

Определить силу тока во всех ветвях цепи, напряжения на отдельных участках и показания измерительных приборов, изображенных на схеме.

Решение:

Определяем круговую частоту переменного тока

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}.$$

Рассчитываем сопротивления реактивных элементов цепи

$$X_{L_1} = \omega L_1 = 314 \cdot 180 \cdot 10^{-3} = 56,5 \text{ Ом}$$

$$X_{C_2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 79,6 \text{ Ом}$$

$$X_{C_3} = \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{314 \cdot 58 \cdot 10^{-6}} = 54,9 \text{ Ом}.$$

Рассчитываем реактивные сопротивления участков цепи

$$X_1 = X_{L_1} - X_{C_1} = 56,5 - 0 = 56,5 \text{ Ом}$$

$$X_2 = X_{L_2} - X_{C_2} = 0 - 79,6 = -79,6 \text{ Ом}$$

$$X_3 = X_{L_3} - X_{C_3} = 0 - 54,9 = -54,9 \text{ Ом}.$$

Определяем полное сопротивление каждого участка

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{78^2 + 56,5^2} = 96,3 \text{ Ом} \\ Z_2 &= \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{43^2 + (-79,6)^2} = 90,5 \text{ Ом} \\ Z_3 &= \sqrt{R_3^2 + X_3^2} = \sqrt{61^2 + (-54,9)^2} = 82,1 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Определяем активную проводимость второго и третьего участка

$$\begin{aligned} g_2 &= \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{43}{90,5^2} = 0,0052 \text{ См} \\ g_3 &= \frac{R_3}{Z_3^2} = \frac{61}{82,1^2} = 0,0091 \text{ См.} \end{aligned}$$

Рассчитываем эквивалентную активную проводимость второго и третьего участка

$$g_{23} = g_2 + g_3 = 0,0053 + 0,0091 = 0,0143 \text{ См.}$$

Определяем реактивную проводимость второго и третьего участка

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{X_2}{Z_2^2} = \frac{-79,6}{90,5^2} = -0,0097 \text{ См} \\ b_3 &= \frac{X_3}{Z_3^2} = \frac{-54,9}{82,1^2} = -0,0082 \text{ См.} \end{aligned}$$

Рассчитываем эквивалентную реактивную проводимость второго и третьего участка

$$b_{23} = b_2 + b_3 = -0,0097 - 0,0082 = -0,0179 \text{ См.}$$

Определяем полную эквивалентную проводимость второго и третьего участка

$$y_{23} = \sqrt{g_{23}^2 + b_{23}^2} = \sqrt{0,0143^2 + (-0,0179)^2} = 0,0229 \text{ См.}$$

Находим полное эквивалентное сопротивление участка 2-3 и разлагаем его на активную и реактивную составляющие

$$\begin{aligned} Z_{23} &= \frac{1}{y_{23}} = \frac{1}{0,0229} = 43,7 \text{ Ом} \\ R_{23} &= g_{23} Z_{23}^2 = 0,0143 \cdot 43,7^2 = 27,3 \text{ Ом} \\ X_{23} &= b_{23} Z_{23}^2 = -0,0179 \cdot 43,7^2 = -34,1 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

На основании результатов расчетов можно выполнить эквивалентное преобразование исходной цепи. При этом необходимо учесть, что участок 1 имеет индуктивный характер нагрузки, а участок 2-3, как следует из расчета – емкостной.

В результате преобразования получается цепь с последовательным соединением всех элементов. Схема цепи изображена на рис. 2.12 .

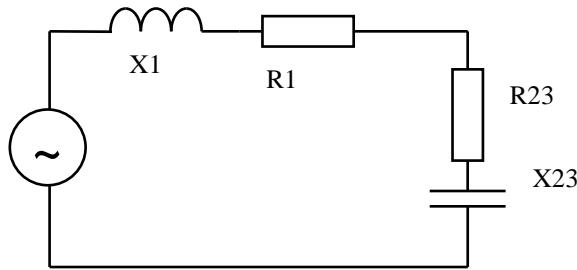


Рис. 2.12

Рассчитываем активное и реактивное сопротивление всей цепи

$$R_{123} = R_1 + R_{23} = 78 + 27,3 = 105,3 \text{ Ом}$$

$$X_{123} = X_1 + X_{23} = 56,5 - 34,1 = 22,4 \text{ Ом.}$$

Определяем полное сопротивление всей цепи

$$Z_{123} = \sqrt{R_{123}^2 + X_{123}^2} = \sqrt{105,3^2 + 22,4^2} = 107,7 \text{ Ом.}$$

Находим силу тока в неразветвленной части цепи (ток, текущий через первый участок)

$$I_1 = \frac{U}{Z_{123}} = \frac{220}{107,7} = 2,04 \text{ А.}$$

Используя закон Ома для участка цепи, рассчитываем напряжение на участке 1

$$U_1 = I_1 Z_1 = 2,04 \cdot 96,3 = 196,9 \text{ В.}$$

Аналогично рассчитываем напряжение на участке 2-3

$$U_{23} = I_1 Z_{23} = 2,04 \cdot 43,7 = 89,3 \text{ В.}$$

Определяем силу тока второго и третьего участка

$$I_2 = \frac{U_{23}}{Z_2} = \frac{89,3}{90,5} = 0,99 \text{ А}$$

$$I_3 = \frac{U_{23}}{Z_3} = \frac{89,3}{82,1} = 1,09 \text{ А.}$$

Находим показания вольтметра

$$U_{R3} = I_3 R_3 = 1,09 \cdot 61 = 66,3 \text{ В.}$$

Находим показания ваттметра

$$P = I_1^2 R_{123} = 2,04^2 \cdot 105,3 = 440 \text{ Вт.}$$

2.3.3 Задача 3. Трехфазные электрические цепи переменного тока

Задание. Для трехфазной электрической цепи переменного тока, соответствующей номеру варианта (таблица 3) и изображенной на рис. 3.1 – 3.10, определить следующее:

1. Фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе (для четырехпроводной схемы).
2. Активную, реактивную и полную мощность всей цепи.

Таблица 3 **Варианты задачи**

Вар №	Рис №	U _л , В	R _a	R _b	R _c	X _a	X _b	X _c	R _{ab}	R _{bc}	R _{ca}	X _{ab}	X _{bc}	X _{ca}
			Ом											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3.1	127	8	8	8	6	4	12	-	-	-	-	-	-
2	3.2	127	-	-	-	-	-	-	10	12	15	25	23	28
3	3.3	220	17	18	16	10	13	18	-	-	-	-	-	-
4	3.4	220	-	-	-	-	-	-	24	28	26	33	28	38
5	3.5	380	20	65	25	40	85	50	-	-	-	-	-	-
6	3.6	380	-	-	-	-	-	-	47	25	62	15	30	10
7	3.7	660	83	58	100	74	60	98	-	-	-	-	-	-
8	3.8	660	-	-	-	-	-	-	92	81	76	51	65	70
9	3.9	127	30	25	10	15	20	25	-	-	-	-	-	-
10	3.10	127	-	-	-	-	-	-	8	4	8	12	16	14
11	3.11	220	22	8	18	20	35	25	-	-	-	-	-	-
12	3.12	220	-	-	-	-	-	-	20	48	30	55	20	63
13	3.13	380	30	40	11	14	20	18	-	-	-	-	-	-
14	3.14	380	-	-	-	-	-	-	45	62	86	90	58	34
15	3.15	660	82	78	67	25	30	13	-	-	-	-	-	-
16	3.16	660	-	-	-	-	-	-	89	95	176	35	58	44
17	3.17	220	14	16	19	15	26	33	-	-	-	-	-	-
18	3.18	380	-	-	-	-	-	-	80	74	30	50	90	70

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
19	3.19	380	48	38	28	16	14	42	-	-	-	-	-	-
20	3.20	220	-	-	-	-	-	-	64	38	56	63	44	38
21	3.2	127	-	-	-	-	-	-	12	10	16	25	28	25
22	3.1	127	10	7	8	9	6	11	-	-	-	-	-	-
23	3.4	220	-	-	-	-	-	-	25	27	29	35	26	37
24	3.3	220	19	16	17	12	14	19	-	-	-	-	-	-
25	3.6	380	-	-	-	-	-	-	57	35	72	25	40	20
26	3.5	380	42	55	35	32	87	58	-	-	-	-	-	-
27	3.8	660	-	-	-	-	-	-	95	87	74	56	68	73

28	3.7	660	86	51	90	78	65	92	-	-	-	-	-	-	-
29	3.10	127	-	-	-	-	-	-	18	14	18	15	17	16	
30	3.9	127	32	21	15	18	22	21	-	-	-	-	-	-	-
31	3.12	220	-	-	-	-	-	-	24	45	32	56	22	65	
32	3.11	220	27	18	14	22	31	27	-	-	-	-	-	-	-
33	3.14	380	-	-	-	-	-	-	46	66	84	92	57	32	
34	3.13	380	35	42	15	12	24	17	-	-	-	-	-	-	-
35	3.16	660	-	-	-	-	-	-	87	91	156	38	56	48	
36	3.15	660	85	72	69	27	34	15	-	-	-	-	-	-	-
37	3.18	380	-	-	-	-	-	-	82	76	34	55	96	75	
38	3.17	220	13	13	17	18	24	36	-	-	-	-	-	-	-
39	3.20	220	-	-	-	-	-	-	62	36	59	65	45	37	
40	3.19	380	46	35	25	18	16	45	-	-	-	-	-	-	-

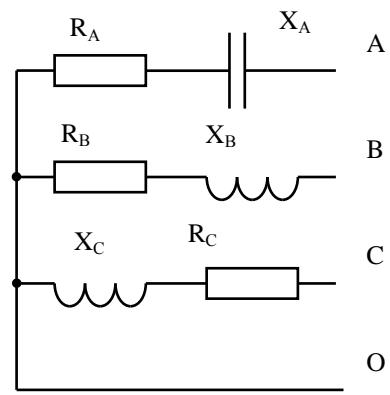


Рис. 3.1

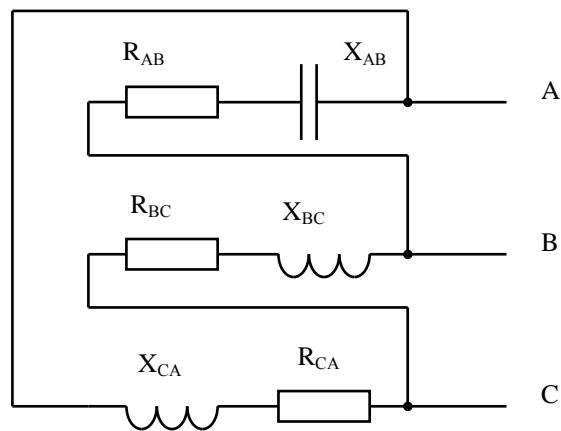


Рис. 3.2

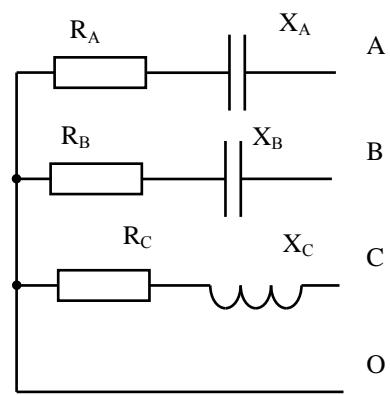


Рис. 3.3

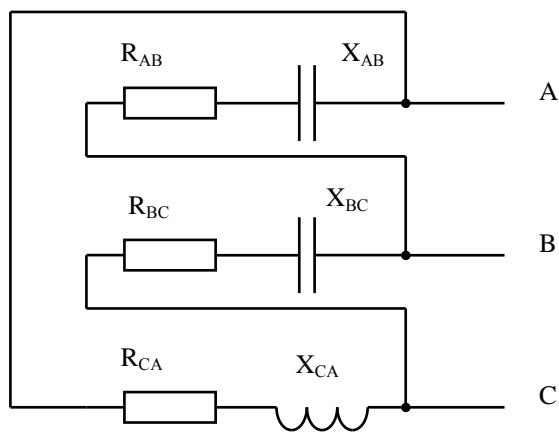


Рис. 3.4

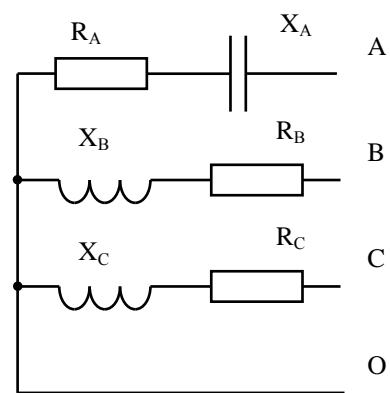


Рис. 3.5

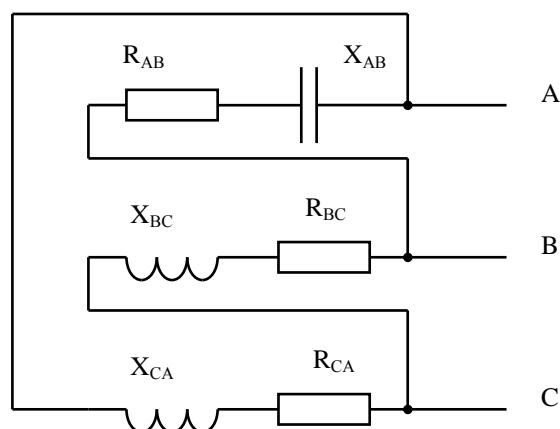


Рис. 3.6

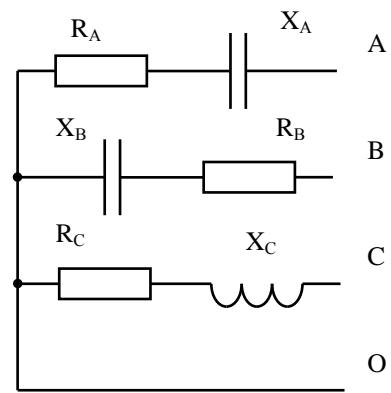


Рис. 3.7

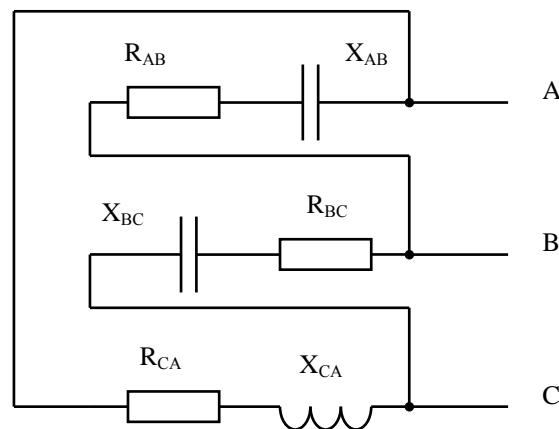


Рис. 3.8

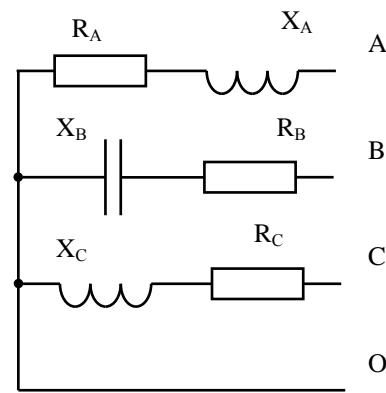


Рис. 3.9

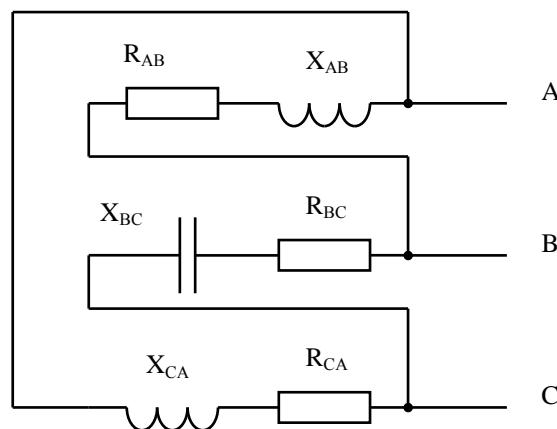


Рис. 3.10

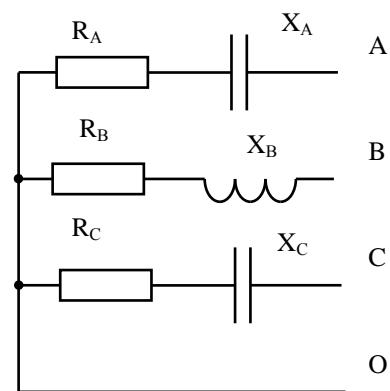


Рис. 3.11

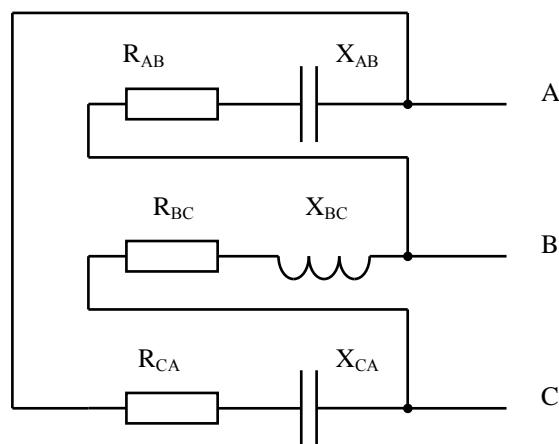


Рис. 3.12

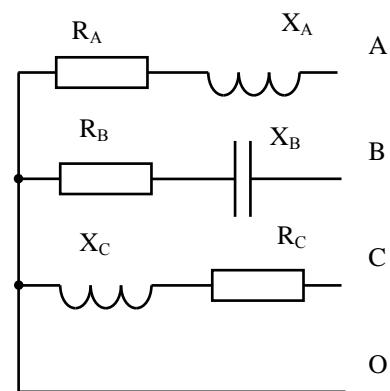


Рис. 3.13

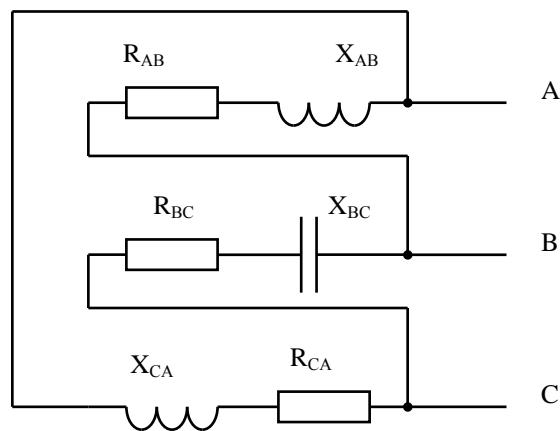


Рис. 3.14

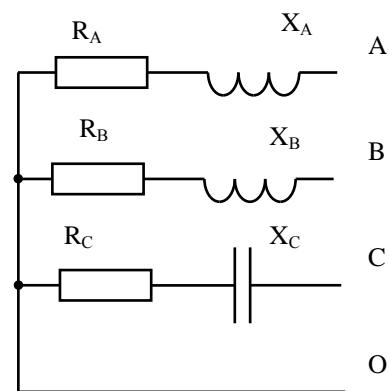


Рис. 3.15

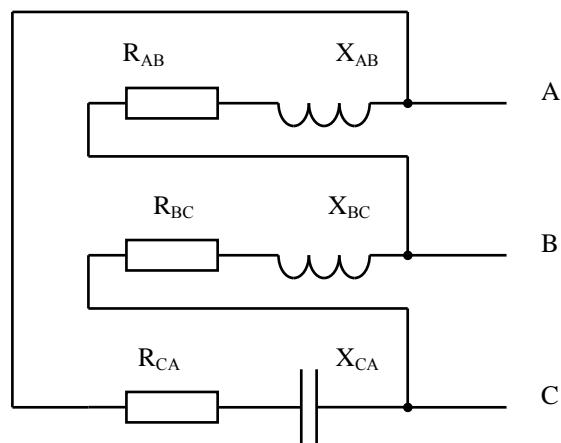


Рис. 3.16

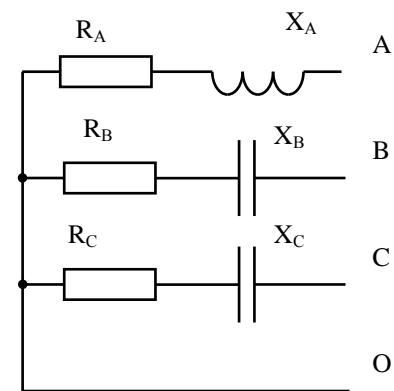


Рис. 3.17

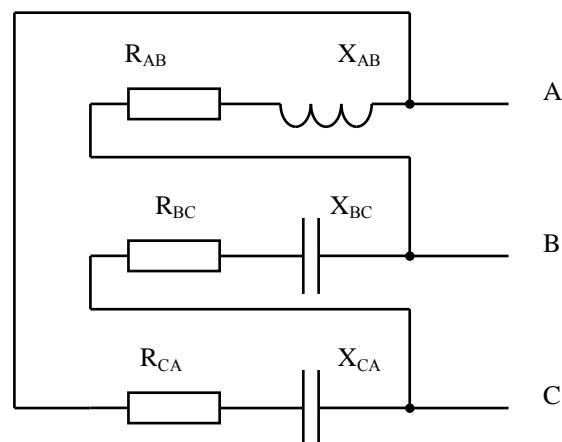


Рис. 3.18

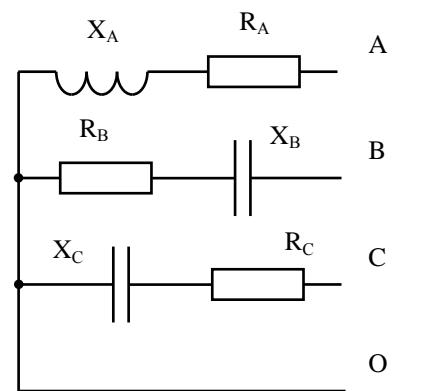


Рис. 3.19

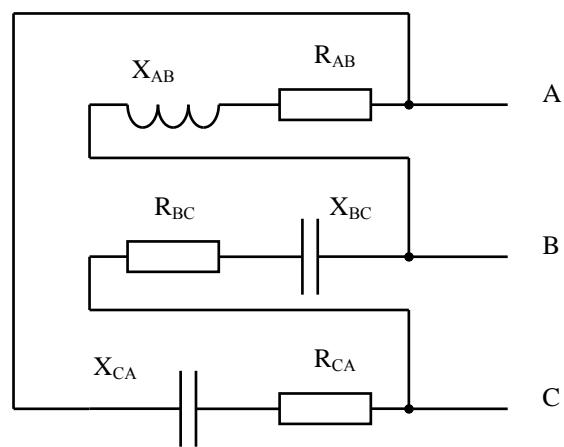


Рис. 3.20

2.3.4 Пример выполнения задачи 3 по расчету трехфазной электрической цепи переменного тока с соединением фаз потребителя звездой с нейтральным проводом

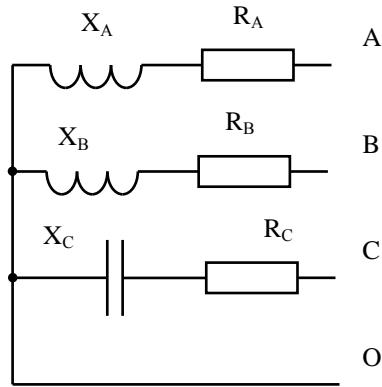


Рис. 3.21

На рисунке 3.21 изображена схема электрической цепи, параметры которой следующие:

$$U_{\text{Л}} = 127 \text{ В}, R_A = 14 \text{ Ом}, R_B = 28 \text{ Ом}, R_C = 26 \text{ Ом}, \\ X_A = 25 \text{ Ом}, X_B = 14 \text{ Ом}, X_C = 11 \text{ Ом}.$$

Определить: фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе, активную, реактивную и полную мощность всей цепи.

Решение:

С учетом типа соединения потребителей, определяем напряжение на фазах нагрузки

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{127 \text{ В}}{\sqrt{3}} = 73 \text{ В}$$

Представляем фазные напряжения в комплексной форме

$$U_A = U_{\phi} \cdot e^{j0^\circ} = 73e^{j0^\circ} \text{ В}; \\ U_B = U_{\phi} \cdot e^{-j120^\circ} = 73e^{-j120^\circ} \text{ В}; \\ U_C = U_{\phi} \cdot e^{j120^\circ} = 73e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Представляем полные сопротивления фаз в комплексной форме (с учетом характера нагрузки в каждой фазе)

$$\begin{aligned} Z_A &= R_A + jX_A = 14 + j25 = 28,7e^{j60,8^\circ} \text{ом}; \\ Z_B &= R_B + jX_B = 28 + j14 = 31,3e^{j26,6^\circ} \text{ом}; \\ Z_C &= R_C + jX_C = 26 - j11 = 28,2e^{-j22,9^\circ} \text{ом}. \end{aligned}$$

Используя закону Ома для участка цепи, находим фазные токи (они же линейные токи)

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{U_A}{Z_A} = \frac{73e^{j0^\circ}}{28,7e^{j60,8^\circ}} = 2,56e^{-j61^\circ} \text{А}; \\ I_B &= \frac{U_B}{Z_B} = \frac{73e^{-j120^\circ}}{31,3e^{j26,6^\circ}} = 2,34e^{-j147^\circ} \text{А}; \\ I_C &= \frac{U_C}{Z_C} = \frac{73e^{j120^\circ}}{28,2e^{-j22,9^\circ}} = 2,6e^{j143^\circ} \text{А}. \end{aligned}$$

Используя первый закон Кирхгофа, определяем ток нейтрального провода

$$\begin{aligned} I_O &= I_A + I_B + I_C = 2,56e^{-j61^\circ} + 2,34e^{-j147^\circ} + 2,6e^{j143^\circ} = \\ &= (1,25 - j2,23) + (-1,95 - j1,29) + (-2,07 + j1,57) = \\ &= -2,77 - j1,95 = 3,4e^{-j145^\circ} \text{А}. \end{aligned}$$

Определяем мощности отдельных фаз

$$\begin{aligned} \tilde{S}_A &= U_A \cdot \overset{*}{I_A} = 73,3e^{j0^\circ} \cdot 2,56e^{j61^\circ} = 187,6e^{j61^\circ} = 92 + j164 \text{ ВА} \\ \tilde{S}_B &= U_B \cdot \overset{*}{I_B} = 73,3e^{-j120^\circ} \cdot 2,34e^{j147^\circ} = 171,5e^{j27^\circ} = 154 + j77 \text{ ВА} \\ \tilde{S}_C &= U_C \cdot \overset{*}{I_C} = 73,3e^{j120^\circ} \cdot 2,6e^{-j143^\circ} = 190,6e^{-j23^\circ} = 175 - j74 \text{ ВА}. \end{aligned}$$

Определяем мощность всей цепи

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \tilde{S}_A + \tilde{S}_B + \tilde{S}_C = (92 + j164) + (154 + j77) + (175 - j74) = \\ &= 421 + j166 = 452e^{j21,5^\circ} \text{ ВА}. \end{aligned}$$

Используя полученное выражение, определяем полную, активную и реактивную мощность цепи

$$S = 452 \text{ ВА}; \quad P = 421 \text{ Вм}; \quad Q = 166 \text{ вар.}$$

Пример выполнения задачи 3 по расчету трехфазной электрической цепи переменного тока с соединением фаз потребителяя треугольником

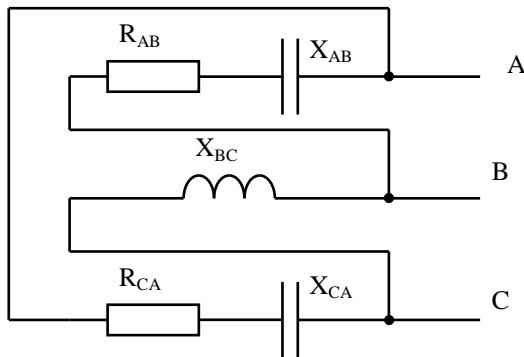


Рис. 3.22

На рисунке 3.22 изображена схема электрической цепи, параметры которой следующие:

$$U_{\text{Л}} = 380 \text{ В}, R_{AB} = 80 \text{ Ом}, R_{CA} = 30 \text{ Ом},$$

$$X_{AB} = 50 \text{ Ом}, X_{BC} = 60 \text{ Ом}, X_{CA} = 70 \text{ Ом}.$$

Определить: фазные и линейные токи, активную, реактивную и полную мощность всей цепи.

Решение:

С учетом типа соединения потребителей, определяем напряжение на фазах нагрузки

$$U_{\phi} = U_{\text{Л}} = 380 \text{ В};$$

Представляем фазные напряжения в комплексной форме

$$\dot{U}_{AB} = U_{\phi} \cdot e^{j0^\circ} = 380 e^{j0^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = U_{\phi} \cdot e^{-j120^\circ} = 380 e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = U_{\phi} \cdot e^{j120^\circ} = 380 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Представляем полные сопротивления фаз в комплексной форме (с учетом характера нагрузки в каждой фазе)

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{AB} &= R_{AB} + jX_{AB} = 80 - j50 = 94,3e^{-j32^\circ} \hat{I} & ; \\ \dot{Z}_{CB} &= R_{BC} + jX_{BC} = 0 + j60 = 60e^{j90^\circ} \hat{I} & ; \\ \dot{Z}_{CA} &= R_{CA} + jX_{CA} = 30 - j70 = 76,2e^{-j67^\circ} \hat{I} & .\end{aligned}$$

Используя закон Ома для участка цепи, находим фазные токи

$$\begin{aligned}\dot{I}_{AB} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{Z}_{AB}} = \frac{380e^{j0^\circ}}{94,3e^{-j32^\circ}} = 4e^{j32^\circ} A; \\ \dot{I}_{BC} &= \frac{\dot{U}_{BC}}{\dot{Z}_{BC}} = \frac{380e^{-j120^\circ}}{60e^{j90^\circ}} = 6,3e^{-j210^\circ} A; \\ \dot{I}_{CA} &= \frac{\dot{U}_{CA}}{\dot{Z}_{CA}} = \frac{380e^{j120^\circ}}{76,2e^{-j67^\circ}} = 5e^{j187^\circ} A.\end{aligned}$$

Используя первый закон Кирхгофа, определяем линейные токи

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 4e^{j32^\circ} - 5e^{j187^\circ} = (3,4 + j2,1) - (-4,9 - j0,6) = \\ &= 8,3 + j2,7 = 8,8e^{j18^\circ} A \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = 6,3e^{-j210^\circ} - 4e^{j32^\circ} = (-5,5 + j3,2) - (3,4 + j2,1) = \\ &= -8,9 + j1,1 = 9e^{j173^\circ} A \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = 5e^{j187^\circ} - 6,3e^{-j210^\circ} = (-4,9 - j0,6) - (-5,5 + j3,2) = \\ &= 0,6 - j3,8 = 3,85e^{-j81^\circ} A\end{aligned}$$

Определяем мощности отдельных фаз

$$\begin{aligned}\tilde{S}_{AB} &= \dot{U}_{AB} \cdot \overset{*}{I}_{AB} = 380e^{j0^\circ} \cdot 4e^{-j32^\circ} = 1520e^{-j32^\circ} = 1298 - j811 BA \\ \tilde{S}_{BC} &= \dot{U}_{BC} \cdot \overset{*}{I}_{BC} = 380e^{-j120^\circ} \cdot 6,3e^{j210^\circ} = 2394e^{j90^\circ} = 0 + j2394 BA \\ \tilde{S}_{CA} &= \dot{U}_{CA} \cdot \overset{*}{I}_{CA} = 380e^{j120^\circ} \cdot 5e^{-j187^\circ} = 1900e^{-j67^\circ} = 747 - j1743 BA\end{aligned}$$

Рассчитываем мощность всей цепи

$$\begin{aligned}\tilde{S} &= \tilde{S}_{AB} + \tilde{S}_{BC} + \tilde{S}_{CA} = (1298 - j811) + (0 + j2394) + (747 - j1743) = \\ &= 2045 - j147 = 2050e^{-j4^\circ} BA\end{aligned}$$

Используя полученное выражение, определяем полную, активную и реактивную мощность цепи

$$S = 2050 BA; \quad P = 2045 Bm; \quad Q = -147 var.$$

При выполнении контрольной работы возможно представление таблицы распределения заданий между обучающимися.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

3.1 Расчет простых цепей постоянного тока

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на метод контурных токов

Метод контурных токов

Метод основан на втором законе Кирхгофа. Вводят такое понятие как контурный ток – ток, протекающий во всех ветвях, образующих данный контур. Количество уравнений при этом сокращается. Представим токи в ветвях через контурные.

$$\begin{aligned} I_{k1} \cdot (R_3 + R_1 + r_{01} + R_6) - I_{k2} \cdot R_3 - I_{k3} \cdot R_6 &= E_1 + E_3 \\ -I_{k1} \cdot R_3 + I_{k2} \cdot (R_5 + R_3 + R_2) - I_{k3} \cdot R_5 &= -E_3 \\ -I_{k1} \cdot R_6 - I_{k2} \cdot R_5 + I_{k3} \cdot (R_6 + R_4 + R_5) &= 0 \end{aligned}$$

Метод эквивалентных преобразований

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на методику преобразования считаются эквивалентными, если токораспределение в не преобразованной части схемы не изменилось.

$$\begin{aligned} I_1 \cdot (R_1 + R_{\text{экв}}) &= E_1 \pm E_{\text{экв}} \\ I_1 &= \frac{E_1 \pm E_{\text{экв}}}{(R_1 + R_{\text{экв}})} \end{aligned}$$

Перерисуем схему для удобства чтения. Четвертая, пятая и шестая ветви образуют пассивный треугольник сопротивлений, который преобразуем в эквивалентную звезду. Сопротивления лучей звезды определяются:

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6}; \quad R_{46} = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6}; \quad R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6}.$$

Так как два узла не образуют узла, то в результате преобразования схемы получили параллельное соединение двух ветвей. Преобразуем его и определим параметры эквивалентных элементов:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{(R_2 + R_{45}) \cdot (R_3 + R_{56})}{R_2 + R_{45} + R_3 + R_{56}}, \quad E_{\text{ЭКВ}} = \frac{E_3 / (R_3 + R_{56})}{1 / (R_2 + R_{45}) + 1 / (R_3 + R_{56})}.$$

Ток первой ветви определиться:

$$I_1 = \frac{E_1 + E_3}{R_1 + r_{01} + R_{\text{ЭКВ}} + R_{46}}.$$

3.2 Расчет магнитных цепей

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на

закон , применяемые при расчете магнитных цепей.

Для расчета магнитных цепей можно воспользоваться законом полного тока. При этом решается одна из двух задач.

Прямая задача, в которой по заданному магнитному потоку Φ в магнитной цепи определяют намагничивающую силу IW .

Обратная задача, в которой по заданной намагничивающей силе IW определяют магнитный поток Φ .

Для однородной магнитной цепи прямая задача решается в следующей последовательности:

- по заданному магнитному потоку и габаритам цепи определяют магнитную индукцию;
- по кривой намагничивания материала сердечника определяют напряженность H по вычисленной индукции B ;
- по закону полного тока определяют намагничивающую силу $IW=Hl$, где S — сечение магнитопровода; l — длина средней линии магнитопровода.

Обратная задача для однородной цепи решается в об-ратной последовательности, т. е.:

- по закону полного тока определяют напряженность поля магнитной цепи ;
- по кривой намагничивания материала сердечника определяют магнитную индукцию B по вычисленному значению напряженности H ;
- определяют магнитный поток цепи $\Phi = BS$.

Для неоднородной неразветвленной магнитной цепи (см. рис. 3.9, а) прямая задача решается в следующей последовательности:

- а) по заданному магнитному потоку Φ , который для всех участков неразветвленной цепи имеет одинаковое значение, определяют магнитную индукцию B каждого однородного участка

Если задана магнитная индукция какого-либо участка $B_{уч}$, то находят магнитный поток этого участка $\Phi_{уч}=B_{уч}S_{уч}$, который для всех участков неразветвленной цепи имеет одинаковое значение. Затем определяют магнитную индукцию остальных участков, как показано выше;

- б) по кривым намагничивания материалов (Приложения 5, 6) определяют напряженности ферромагнитных участков H_1 и H_2 . Напряженность в воздушном зазоре вычисляют по выражению ;
- в) определив длину средней линии каждого участка, по закону полного тока (второй закон Кирхгофа для магнитной цепи), вычисляют намагничивающую силу рассчитываемой магнитной цепи, или ток I , или витки W .

Закон полного тока.

Магнитное поле создается электрическими токами. Количественная связь между линейным интегралом от вектора напряженности магнитного поля H вдоль любого произвольного контура и алгебраической суммой токов охваченных этим контуром, определяется законом полного тока

Положительное направление интегрирования связано с положительным направлением тока правилом правого винта. Если контур интегрирования будет пронизывать катушку с числом витков до, по которой проходит ток , то .

Закон полного тока является опытным законом. Его можно экспериментально проверить путем измерения с помощью специального устройства (известного из курса физики), называемого магнитным поясом.

3.3 Компенсация реактивной мощности

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на способы компенсации реактивной мощности

Мощность в цепи с резистивным элементом.

Если двухполюсник содержит только резистивный элемент, обладающий активным сопротивлением, то энергия накапливаться в нем не может. Ток и напряжение всегда одного знака, следовательно, мгновенная мощность всегда по знаку положительна.

Среднее значение мгновенной мощности за период называется активной мощностью и определяется выражением:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = UI \cos \varphi = UI$$

Мощность в цепи с индуктивным элементом.

Рассмотрим двухполюсник, в который включен индуктивный элемент. Ток индуктивности отстает от напряжения на угол 90^0 . Таким образом, мгновенная мощность на индуктивности имеет только гармоническую составляющую, изменяющуюся с двойной частотой. Когда ток возрастает, происходит накопление энергии в магнитном поле индуктивности. Когда ток убывает, его магнитное поле в индуктивности распадается, а энергия, при посредстве ЭДС самоиндукции вся возвращается назад в источник.

В течение второй четверти периода мгновенная мощность отрицательна, так как индуктивность не поглощает энергию, а сама становится источником энергии.

Таким образом, ток в цепи с индуктивностью не совершает работу, он обусловливается лишь колебаниями энергии. Такой ток именуется реактивным. Он бесполезно загружает источник и провода линии электропередач, следовательно, для электроэнергетики он является вредным.

Среднее значение мгновенной мощности за период (активная мощность) равна нулю. В цепи происходят колебания энергии между источником энергии и магнитным полем потребителя. Амплитуду колебаний мгновенной мощности в цепи с индуктивностью называют реактивной индуктивной.

$$Q = I^2 \cdot X_L, \text{ [вар].}$$

Мощность в цепи с емкостным элементом.

В цепи с емкостным элементом ток опережает напряжение на 90^0 . Как и в случае с идеальным индуктивным элементом, мгновенная мощность на гармоническую составляющую, изменяющуюся с двойной частотой. Однако накопление энергии, заряд конденсатора, происходит, когда возрастает не ток, а напряжение, и конденсатор разряжается когда напряжение уменьшается.

И, также как и в цепи с индуктивностью, ток в цепи с емкостным элементом не совершает работы.

Среднее значение мгновенной мощности за период (активная мощность) равна нулю. В цепи происходят колебания энергии между источником энергии и магнитным полем потребителя. Амплитуду колебаний мгновенной мощности в цепи с индуктивностью называют реактивной индуктивной.

$$Q_C = I^2 \cdot X_C, \text{ [вар].}$$

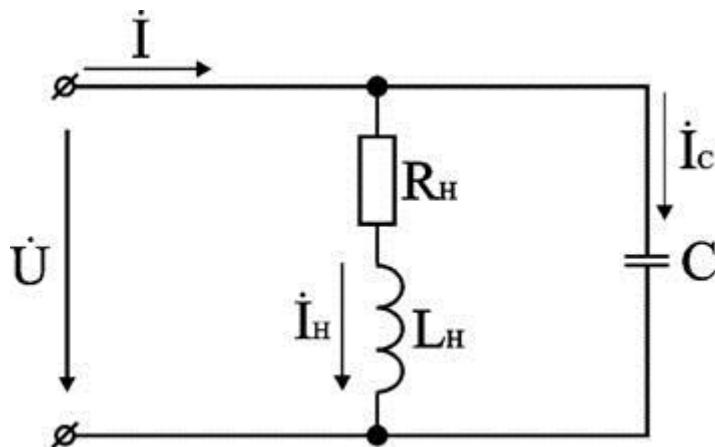
Активная мощность потребителя определена формулой

$$P = U I \cos \varphi.$$

Величину $\cos \varphi$ здесь называют коэффициентом мощности. Ток в линии питающей потребителя с заданной мощностью P равен

$$I = P / (U \cos \varphi).$$

и будет тем больше, чем меньше $\cos \varphi$. При этом возрастают потери в питающей линии. Для их снижения желательно увеличивать $\cos \varphi$. Большинство потребителей имеет активно-индуктивную нагрузку. Увеличение $\cos \varphi$ возможно путем компенсации индуктивной составляющей тока путем подключения параллельно нагрузке конденсатора (рис. 2.24).



Расчет емкости дополнительного конденсатора для обеспечения заданного $\cos \varphi$ проводится следующим образом. Пусть известны параметры нагрузки P_H , U и I_H . Можно определить $\cos \varphi_H$

$$\cos \varphi_H = P_H / (U I_H).$$

Из п. 2.8.3 следует, что подключение емкости не изменяет активную составляющую нагрузки

(2.52)

$$I_{\text{ha}} = I_{\text{h}} \cos \varphi_{\text{h}} = P_{\text{h}} / U$$

Реактивная составляющая нагрузки I_{hp} может быть выражена через $\operatorname{tg} \varphi_{\text{h}}$

$$I_{\text{hp}} = I_{\text{ha}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{h}}.$$

При подключении емкости величина I_{hp} уменьшается на величину I_{C} .

Если задано, что коэффициент мощности в питающей линии должен быть равен $\cos \varphi$, то можно определить величину реактивной составляющей тока в линии

$$I_{\text{p}} = I_{\text{a}} \operatorname{tg} \varphi.$$

Уменьшение реактивной составляющей нагрузки с I_{hp} до I_{p} определяет величину тока компенсирующей емкости

$$I_{\text{C}} = I_{\text{hp}} - I_{\text{p}} = I_{\text{a}} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{h}} - \operatorname{tg} \varphi).$$

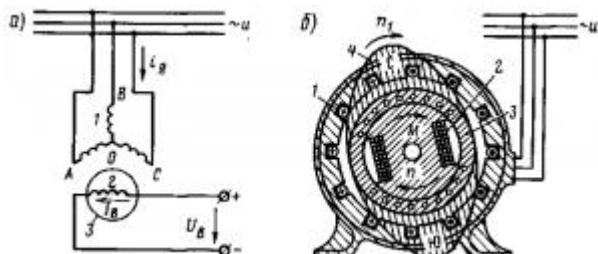
Подставляя в уравнение (2.53), значение I_{ha} из (2.52) и учитывая, что $I_{\text{C}} = U / X_{\text{C}} = U \omega C$, получим $U \omega C = P_{\text{h}} / U \cdot (\operatorname{tg} \varphi_{\text{h}} - \operatorname{tg} \varphi)$, откуда для емкости конденсатора имеем

$$C = P_{\text{h}} / \omega U^2 \cdot (\operatorname{tg} \varphi_{\text{h}} - \operatorname{tg} \varphi).$$

Для больших значений P_{h} величина емкости C может оказаться слишком большой, что технически трудно реализовать. В этом случае используют синхронные компенсирующие машины.

3.4 Синхронные машины. Машины постоянного тока

Синхронный двигатель. Принцип действия и устройство. Синхронный двигатель может работать в качестве генератора и двигателя. Синхронный двигатель выполнен так же, как и синхронный генератор. Его обмотка якоря 1 (рис. 1, а) подключена к источнику трехфазного переменного тока; в обмотку возбуждения 2 подается от постороннего источника постоянный ток. Благодаря взаимодействию вращающегося магнитного поля 4, созданного трехфазной обмоткой якоря, и поля, созданного обмоткой возбуждения, возникает электромагнитный момент M (рис. 1, б), приводящий ротор 3 во вращение. Однако в синхронном двигателе в отличие от асинхронного ротор будет разгоняться до частоты вращения $n = n_1$, с которой вращается магнитное поле (до



синхронной частоты вращения). Объяс

Рис. 1. Электрическая (а) и электромагнитная (б) схемы синхронного электродвигателя

няется это тем, что ток в обмотку ротора подается от постороннего источника, а не индуцируется в нем магнитным полем статора и, следовательно, не зависит от частоты вращения вала двигателя. Характерной особенностью синхронного двигателя является постоянная частота вращения его ротора независимо от нагрузки.

Электромагнитный момент. Электромагнитный момент в синхронном двигателе возникает в результате взаимодействия магнитного потока ротора (потока возбуждения Φ_b) с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазным током, протекающим по обмотке якоря (потоком якоря Φ_b). При холостом ходе машины оси магнитных полей статора и ротора совпадают (рис. 2, а). Поэтому электромагнитные силы I , возникающие между «полюсами» статора и полюсами ротора, направлены радиально (рис. 2, б) и электромагнитный момент машины равен нулю. При работе машины в двигательном режиме (рис. 292, в и г) ее ротор под действием приложенного к валу внешнего нагрузочного момента M_{bh} смещается на некоторый угол θ против направления вращения. В этом случае в результате электромагнитного взаимодействия между ротором и статором создаются электромагнитные силы I , направленные по направлению вращения, т. е. образуется вращающий электромагнитный момент M , который стремится преодолеть действие внешнего момента M_{bh} . Максимум момента M_{max} соответствует углу $\theta = 90^\circ$, когда оси полюсов ротора расположены между осями «полюсов» статора.

Если нагрузочный момент M_{bh} , приложенный к валу электродвигателя, станет больше M_{max} , то двигатель под действием внешнего момента M_{bh} останавливается; при этом по обмотке якоря неподвижного двигателя будет протекать очень большой ток. Этот режим называется выпаданием из синхронизма, он является аварийным и не должен допускаться.

При работе машины в генераторном режиме (рис. 2, д и е) ротор под действием приложенного к валу внешнего момента M_{bh} смещается на угол θ по направлению вращения. При этом создаются электромагнитные силы, направленные против вращения, т. е. образуется тормозной электромагнитный момент M . Таким образом, при изменении значения и направления внешнего момента на валу ротора M_{bh} изменяется лишь угол θ между осями полей статора и ротора, в то время как в асинхронной машине в этом случае изменяется частота вращения ротора.

Пуск в ход и регулирование частоты вращения. Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. Если подключить обмотку якоря к сети переменного тока, когда ротор неподвижен, а по обмотке возбуждения проходит постоянный ток, то за один период изменения тока электромагнитный момент будет дважды менять свое направление, т. е. средний момент за период будет равен нулю. Следовательно, для пуска в ход синхронного двигателя необходимо разогнать его ротор с помощью внешнего момента до частоты вращения, близкой к синхронной. Для этой цели применяют *метод асинхронного пуска*. Синхронный двигатель пускают в ход как асинхронный, для чего его снабжают специальной короткозамкнутой пусковой обмоткой 3 (рис. 3). В полюсные наконечники ротора 2 синхронного двигателя закладывают медные или латунные стержни, замкнутые накоротко двумя торцовыми кольцами. Пусковая обмотка выполнена подобно беличьей клетке асинхронной машины, но занимает лишь часть окружности ротора. В некоторых двигателях специальная короткозамкнутая обмотка

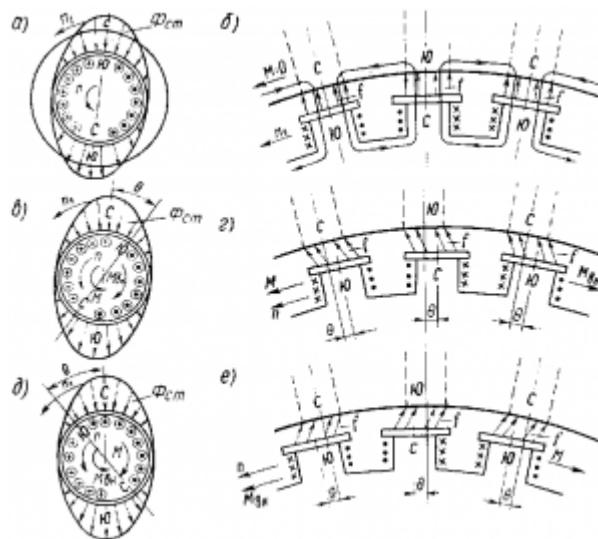


Рис. 2. Электромагнитный момент в синхронной машине, образующийся в различных режимах

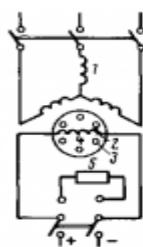


Рис. 293

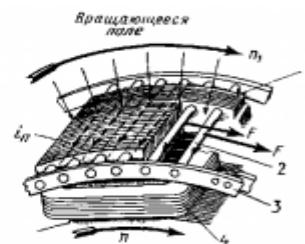


Рис. 294

Рис. 3. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя;

Рис. 4 Устройство пусковой обмотки синхронного двигателя: 1 — ротор; 2 — стержни; 3 — кольцо; 4 — обмотка возбуждения

2.5 Электронные генераторы.

Электронным генератором называют устройство, создающее электрические колебания определенной частоты и формы и использующее для этого энергию источника постоянного тока (напряжения).

По принципу действия генераторы бывают с внешним и внутренним возбуждением. Генераторы с внутренним возбуждением (автогенераторы) возбуждаются самостоятельно (без внешнего источника). Основными характеристиками генераторов являются форма, частота и амплитуда создаваемых колебаний.

По форме колебаний генераторы подразделяются на генераторы синусоидальных колебаний и генераторы несинусоидальных (релаксационных) колебаний.

По частоте колебаний генераторы подразделяются на низкочастотные (от долей герц до 100 кГц), высокочастотные (100 кГц ... 10 мГц) и сверхвысокочастотные (более 10 мГц). Важными характеристиками являются мощность выходного сигнала, стабильность частоты и коэффициент полезного действия.

Генераторы синусоидальных колебаний

Любой генератор состоит из усилителя и цепи положительной обратной связи. Структурная схема генератора представлена на рис. 1



Рис1

За счет влияния цепи обратной связи на делитель на его выходе появляется напряжение даже при отсутствии напряжения на входе, т.е. происходит самовозбуждение делителя и превращение его в генератор.

Чтобы на выходе генератора получить периодические колебания заданной частоты, в цепь его обратной связи необходимо включить колебательный контур, настроенный на данную частоту. В зависимости от состава элементов контура автогенераторы бывают LC и RC-типов (рис. 2).

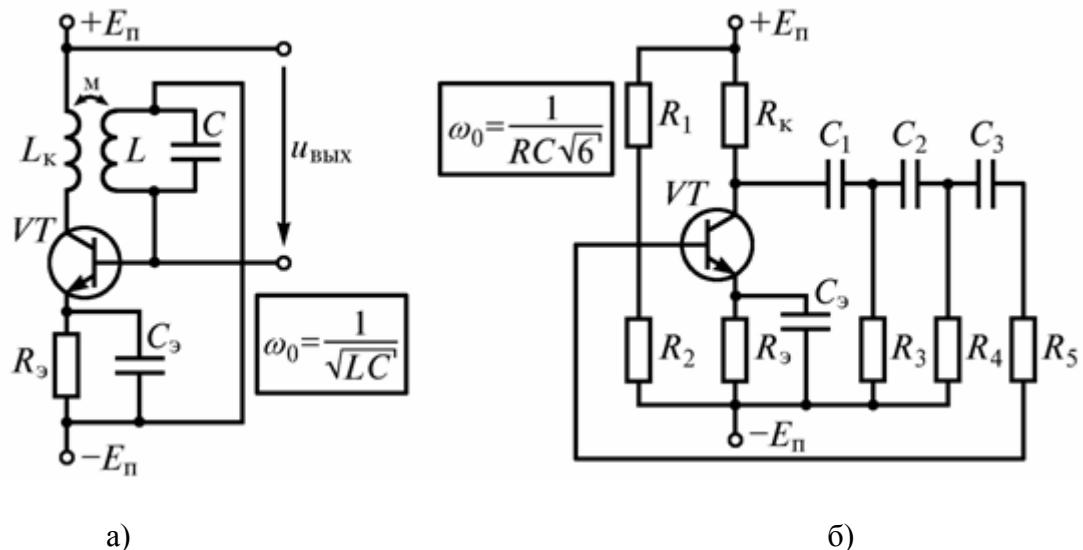


Рис. 2

Схема LC -генератора (рис.2 а) объединяет однокаскадный делитель на транзисторе VT и колебательный контур LC , включенный в цепь положительной обратной связи генератора. Подбором L и C устанавливают требуемую частоту колебаний ω_0 .

После включения источника питания $E_{\text{п}}$ в контуре LC возникают колебания и переменный ток базы i_b усиливается транзистором. Протекающий через катушку ток коллектора i_k создает на ней падение напряжения, которое в противофазе (вследствие встречного включения катушек L_K и L) за счет индуктивной связи между катушками подается в

колебательный контур. Амплитуда колебаний постепенно возрастает до определенного значения (насыщения транзистора) и в дальнейшем не изменяется.

Недостатком рассмотренной схемы генератора является большое влияние температуры на амплитуду и частоту вырабатываемых напряжений. Поэтому часто эти схемы дополняют элементами, стабилизирующими параметры генерируемых напряжений.

Для получения периодических напряжений низкой частоты (от долей герца до нескольких килогерц) целесообразно в генераторе вместо LC контура использовать RC-цепь (рис. 2 б).

Эта замена упрощает конструкцию и снижает массу генератора. В отличие от LC-генератора в этой схеме положительная обратная связь образована частотно-зависимой RC-цепью. Если выходное напряжение генератора, снимаемое с коллектора транзистора, подать непосредственно на вход усилителя (на базу транзистора), то создается отрицательная обратная связь.

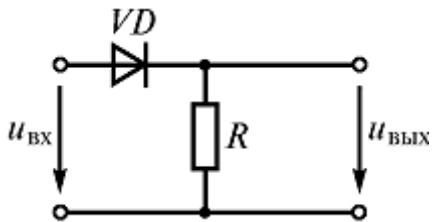
Чтобы получить одинаковые фазы выходного и входного напряжений, необходимо напряжение на RC-цепи сдвинуть на 180° . Это осуществляют тремя RC-элементами, каждый из которых позволяет получить фазовый сдвиг на 60° . Несмотря на усложнение схемы генератора, она проста в реализации, особенно для низких частот, так как не требует индуктивных катушек, имеющих большие габариты и массу.

2.6 Электронные ключи. Электронные реле

Электронные ключи

Для выполнения различных коммутаций в устройствах автоматики и вычислительной техники, включения и выключения элементов, источников питания используют электронные ключи.

В статическом режиме ключ может находиться либо в замкнутом состоянии (включенном), либо в разомкнутом (выключенном). Основу любого ключа составляет активный элемент (диод, транзистор, тиристор), работающий в ключевом режиме.

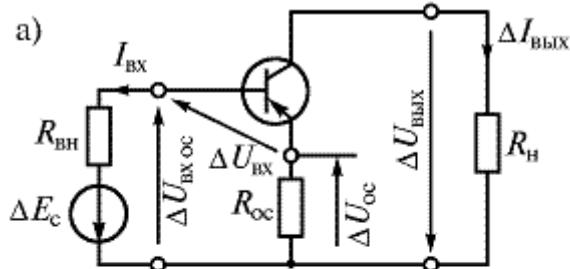


Электронные ключи характеризуют следующими параметрами: переключательной характеристикой, представляющей собой

Рис. 1

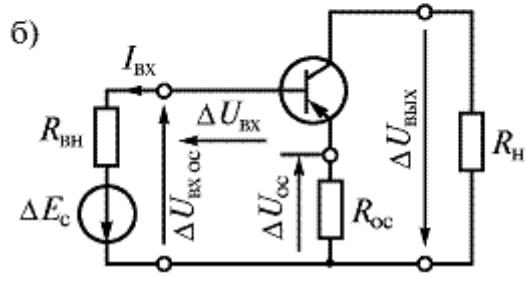
зависимость $U_{вых} = f(U_{вх})$; нагрузочной характеристикой, определяемой зависимостью выходного параметра от нагрузки;

помехоустойчивостью и мощностью, потребляемой от источника питания.



Простейшая схема ключа может быть реализована на основе диода (рис. 1). Замкнутому положению такого ключа соответствует наличие на его входе напряжения положительной полярности. Если на входе действует сигнал полярности, то ключ открыт – разомкнут.

Рис. 2

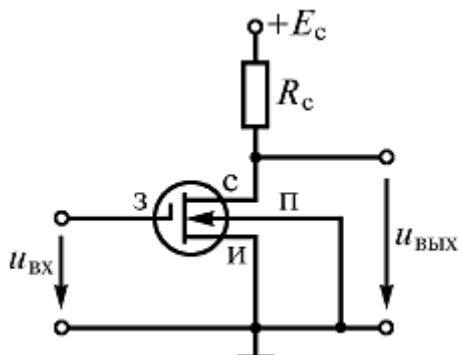


Диодные ключи применяют в основном для ограничения амплитуд напряжения.

Их недостатками являются невозможность усиления входного напряжения и наличие непосредственной связи между выходной и входной цепями.

Такие недостатки отсутствуют у транзисторных ключей (рис. 2), так как

закрытый биполярный транзистор имеет очень большое сопротивление, а открытый – очень малое. Кроме того, транзисторный ключ позволяет усиливать входной сигнал по мощности и разделять выходную и входную цепи. При отсутствии входного сигнала транзистор закрыт и ток его коллектора очень мал. При поступлении на вход импульса прямоугольной формы транзистор открывается и в цепи коллектора протекает максимальный ток, зависящий от крутизны его выходной характеристики. Особенностью такого ключа является сохранение напряжения в течение некоторого времени на его выходе после исчезновения входного импульса.



Это явление обусловлено временем жизни неосновных носителей зарядов в области базы транзистора. Для уменьшения времени нарастания (фрона) и спада (среза) выходного импульса применяют различные способы. Один из них – использование RC-цепи на входе схемы. В момент нарастания импульса конденсатор заряжается, в момент спада –

Рис. 3

разряжается через резистор. При этом на резисторе, значит, и на базе транзистора создается положительный потенциал, запирающий транзистор, и вследствие этого ток

коллектора быстро уменьшается.

Время переключения ключей на биполярных транзисторах, а также входное сопротивление можно увеличить, используя вместо биполярных транзисторов полевые (рис. 3).

Триггеры

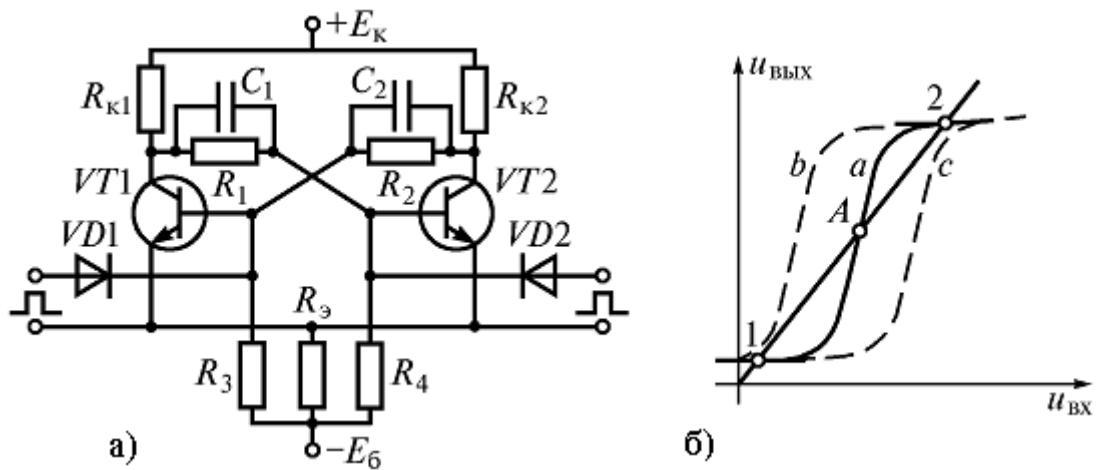


Рис. 4

Электронное устройство, имеющее два устойчивых стационарных состояния, в котором переходы из одного состояния в другое и обратно осуществляются под действием запускающих импульсов, называется триггером. Триггер содержит два транзистора, включенных по схеме с общим эмиттером и образующих двухэлементный усилитель постоянного тока, охваченный положительной обратной связью по напряжению (рис. 4 а).

Стационарные режимы триггера возможны при равенстве входного и выходного напряжений (точки 2, А, 1 на рис. 4 б). Стационарный режим, соответствующий точке А, неустойчивый.

При любом незначительном отклонении от этого режима триггер переходит в одно из двух устойчивых состояний: 1 или 2. В состоянии 1 транзистор VT1 открыт, VT2 закрыт. В состоянии 2 наоборот. Переход триггера из одного состояния в другое возможен, например, при подаче короткого положительного импульса на базу или короткого отрицательного импульса на коллектор закрытого транзистора.

В современной электронике триггеры выполняются на базе интегральных микросхем, построенных на основе логических элементов (см. гл. 16) и относятся к базовым элементам цифровой и электронно-вычислительной техники.

Электронные реле

Для управления различными технологическими процессами переключения (включения, выключения) в производстве и быту широко применяются бесконтактные коммутирующие устройства, называемые электронными реле.

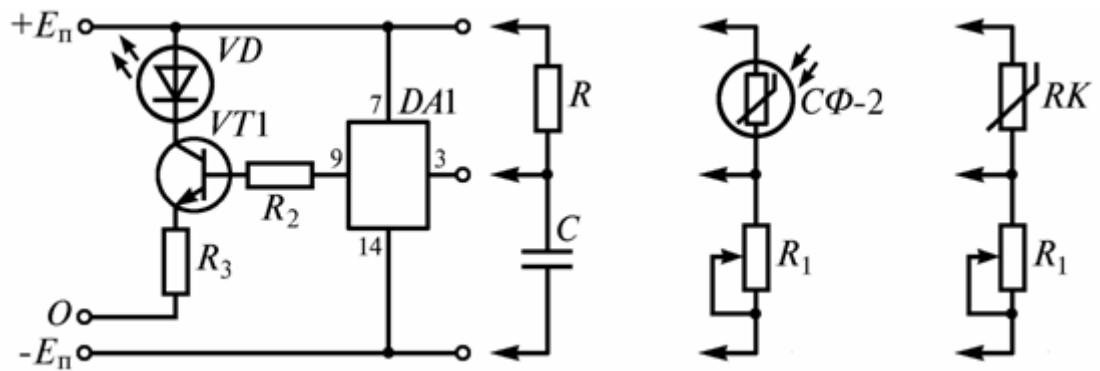


Рис. 5 (а,б,в)

Электронные реле в настоящее время выполняют на основе интегральных микросхем. Основной частью электронного реле является усилитель постоянного тока. На вход усилителя подается сигнал от преобразователя электрической величины, устройство которого зависит от типа реле. Это может быть фотоэлектрический преобразователь (фотоэлектронное реле), термопара или терморезистор (тепловое реле), RC-цепь для задания времени срабатывания и др. На рис. 5 представлена схема простейшего электронного реле, выполненного на интегральном усилителе типа К118ТЛ1Г: а – реле времени, б – фотореле, в – тепловое реле.

При подключении RC-цепи к источнику постоянного напряжения начинает заряжаться конденсатор. Как только напряжение на нем достигает значения, достаточного для срабатывания усилителя, на его выходе появляется напряжение

U . Продолжительность выдержки реле определяется постоянной времени заряда конденсатора $\tau = RC$. По истечении времени $t = 3\tau$ напряжение на конденсаторе становится почти равным U ($U_c = 0,95U$), а продолжительность выдержки (с) реле

$$T_3 = RC \ln \frac{U}{U - U_{cp}} \quad (1)$$

где U_{cp} – напряжение срабатывания реле.

Продолжительность выдержки реле регулируют изменением сопротивления резистора R , через который заряжается конденсатор. Для повторного срабатывания реле необходимо отключить его от источника питания для возврата реле в первоначальное состояние.

В схеме фотореле (рис. 5 б) чувствительным к свету элементом является фоторезистор. Принцип действия такой схемы аналогичен рассмотренной. Чувствительность фотореле устанавливают переменным резистором R_1 , при регулировании которого изменяют входное напряжение усилителя – напряжение срабатывания реле. Особенностью конструкции фотореле является необходимость защиты фоторезистора от посторонних источников света, воздействие которых может привести к ложному срабатыванию реле.

В схеме теплового реле (рис. 5 в) чувствительном к температуре элементом является терморезистор – резистор, сопротивление которого в большей мере зависит от температуры окружающей среды. Изменение сопротивления терморезистора под действием температуры

ведет к изменению напряжения на нем. Это напряжение поступает на вход усилителя. Чувствительность теплового реле, как и фотореле, регулируют переменным резистором R_4 .

Особенностью электронных реле является необходимость их предварительной градуировки. Для градуировки фотореле применяют источник света с регулируемым световым потоком и образцовый прибор для измерения освещенности – люксметр, для градуировки теплового реле – регулируемый источник тепла и образцовый термометр; для реле времени – секундомер.

3.7 Электроизмерения

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Электрические измерительные приборы - необходимые элементы электрических цепей при контроле режимов работы электрооборудования, учете электроэнергии, при экспериментальном исследовании электрических цепей, при получении достоверной информации для систем автоматического управления.

Электрические измерительные приборы измеряют как электрические величины (ток, напряжение, мощность, $\cos \phi$, частоту, электрическую энергию и т.д.), так и неэлектрические величины (температуру, давление и др.).

Электрические и измерительные приборы отличаются высокой чувствительностью, простой конструкцией и надежностью. Показания электрических измерительных приборов относительно просто передавать на дальние расстояния (телеизмерения) при автоматизации и управлении технологическими процессами.

Недостатком электрических измерительных приборов является невозможность их применения на взрывоопасных и пожароопасных помещениях.

1. Системы электрических измерительных приборов

Электрический измерительный прибор состоит из подвижной и неподвижной частей. По перемещению подвижной части измеряют значения измеряемых величин.

В зависимости от принципа действия различают системы: магнитоэлектрическую, электромагнитную, электродинамическую, тепловую, индукционную и др.

Таблица 1. - Системы электрических измерительных приборов и их условные обозначения

№ п/п	Система прибора	Обозначение
1	Магнитоэлектрическая	
2	Электромагнитная	
3	Электродинамическая	
4	Тепловая	
5	Индукционная	

В таблице 1 приведены условные обозначения наиболее широко применяемых систем приборов. Эти обозначения и другие важнейшие характеристики приборов указываются на лицевой панели электрических измерительных приборов (рис. 1).

Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии поля постоянного магнита и подвижной катушки.

На рисунке 2 показана основная часть магнитоэлектрического измерительного механизма; подвижная катушка, расположенная в сильном равномерном радиальном магнитном поле.

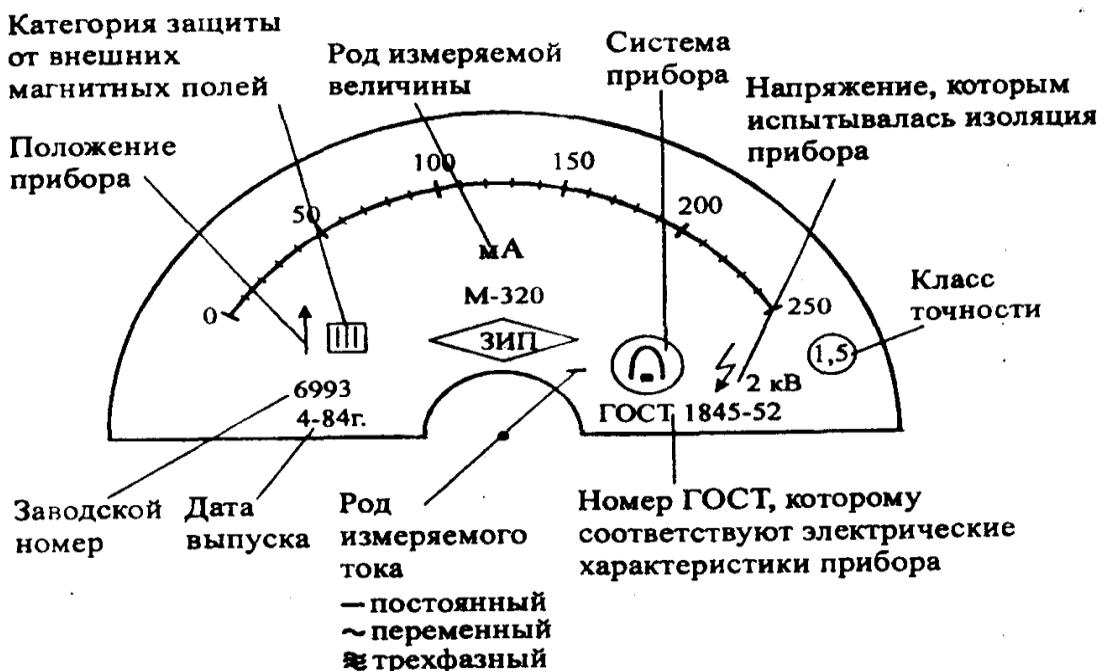


Рисунок 1 - Шкала измерительного прибора

Подвижная катушка из тонкого медного или алюминиевого провода намотана на каркас (или без него). На оси подвижной части прибора укреплена стрелка, конец которой перемещается по шкале электрического измерительного прибора.

При протекании по катушке электрического тока согласно закону Ампера возникают силы F , стремящиеся повернуть катушку. При равенстве врачающего Мвр и противодействующего Мпр моментов катушка останавливается.

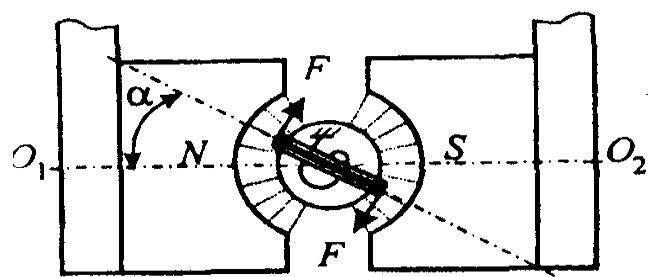


Рисунок 2. подвижная катушка в радиальном магнитном поле

Для создания противодействующего момента $M_{пр}$ при одновременно для подвода тока в катушку служат две спирали.

Общее выражение для врачающего момента имеет вид:

(1.)

$$M_{вр} = dW/d\alpha$$

где W - энергия электромагнитного поля, сосредоточенная в измерительном механизме; a - угол поворота подвижной части.

Энергия электромагнитного поля W равна работе g при перемещению активной части провода катушки в постоянном магнитном поле с индукцией B

Согласно закона Ампера сила F , действующая часть провода катушки при протекании по ней тока I равны:

$$F = I \times B \times \sin \phi \quad (2)$$

где ϕ - угол между направлением тока в активной части провода и индукцией магнитного поля;

l - длина активной части катушки.

В нашем случае $\phi = \pi/2 \sin \phi = 1$. Следовательно, работа по перемещению двух активных частей провода катушки, перпендикулярных плоскости чертежа (рис. 2), равна

$$A = W = 2F \times X = 2I \times B \times l \times r, \quad (3)$$

где $X = rx$ α - длина траектории активной части провода;

r - радиус траектории;

α - угол поворота катушки. Подставляя (3) в (1) получаем:

dW

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW}{d\alpha} = 2I \times B \times l \times r.$$

Так как противодействующий момент $M_{\text{вр}}$ создается упругими элементами, то для установившегося режима

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{вр}} \text{ или } W \phi = 2I \times B \times l \times r.,$$

где W - удельный противодействующий момент, зависящий от свойств упругого элемента. Следовательно, угол поворота катушки α пропорционален току I :

$$\alpha = \frac{2B \cdot l \cdot r}{W} \cdot I = S \cdot I, \quad (4)$$

где S - чувствительность измерительного механизма.

Как видно из (4) при перемене направления тока в катушке меняется на обратное и направление отклонения подвижной части и указателя (стрелки).

Для получения отклонения указателя в нужную сторону необходимо при включении прибора соблюдать указанную на приборе полярность

Достоинства приборов магнитоэлектрической системы: высокая чувствительность к измеряемой величине, высокая точность (класс точности 0,05 малое потребление мощности, малая чувствительность к внешним магнитным полям). Недостаток - возможность применения только в цепях постоянного тока.

В приборах электромагнитной системы в неподвижной катушке, по которой протекает измеряемый ток, создает магнитное поле, в которое втягивается, поворачиваясь на оси, ферромагнитный сердечник, намагничиваемый этим же полем. Причем втягивающее происходит как при постоянном, так и при переменном магнитном поле, а угол поворота α пропорционален квадрату силы измеряемого тока. Поэтому:

а) приборы электромагнитной системы могут применяться в цепях постоянного и переменного тока;

б) шкала прибора неравномерна, сильно сжат в начальной части.

Достоинства электрических измерительных приборов электромагнитной системы: простота и надежность конструкции, небольшое потребление мощности.

Недостатки: невысокая чувствительность к измеряемой величине, относительно низкая точность (класс точности до 1.0), большая чувствительность к внешним магнитным полям.

Вращающий момент электромагнитного измерительного механизма

$$M_{sp} = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{L \cdot I^2}{2}\right)}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}.$$

Если противодействующий момент создается с помощью упругих элементов, то для режима установившегося отклонения

$$M = Wa \quad \text{и} \quad a = \frac{1}{2W} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}. \quad (5.)$$

2 Основные характеристики электрических измерительных приборов

2.1 Статическая характеристика. Статическая характеристика измерительного прибора - зависимость выходного сигнала y от входного сигнала x в статическом режиме работы указанного прибора.

Статическая характеристика в общем случае описывается нелинейным уравнением

$$y = f(x),$$

Так, например, для электронных измерительных приборов магнитоэлектрической системы статической характеристикой будет являться уравнение (3), в котором входным сигналом будет являться электрический

$$A = SI,$$

Поскольку

$$S = \frac{2 \cdot B \cdot L \cdot r}{W} = \text{const}$$

то статическая характеристика электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы линейная.

2.2. Погрешность. Абсолютная погрешность прибора в данной точке диапазона измерения равен:

$$\Delta = x - x_u$$

где x - показание прибора;

x_u - истинное значение измеряемой величины.

Однако в связи с тем, что истинное значение чаще всего неизвестно, вместо него используется действительное значение: x_d , в качестве которого применяют либо среднее арифметическое значение ряда измерений, либо показания образцового прибора.

Очевидно, что абсолютная погрешность прибора выражается в тех же единицах, что и измеряемая величина.

Абсолютная погрешность прибора не характеризует в полной мере точность измерения, поэтому при измерениях определяется также *относительная погрешность* - отношение абсолютной погрешности к истинному (действительному) значению измеряемой величины

$$\delta = \frac{\Delta}{x_u} = \frac{\Delta}{x_d}, \quad (7.)$$

или в процентах

$$\delta(\%) = \frac{\Delta}{x_d} 100\%. \quad (8.)$$

Приведенная погрешность у электрического измерительного прибора равна отношению абсолютной погрешности к нормирующему значению x_N , которое принимается равным верхнему пределу измерений (если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы) или диапазону измерения (если нулевая отметка находится внутри диапазона измерения)

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N}, \quad (9)$$

или в процентах

$$\gamma(\%) = \frac{\Delta}{x_N} 100\% \quad (9)$$

Погрешность электроизмерительного прибора зависит от условий проведения измерений. Различают *основную* и *дополнительную* погрешности.

Основная погрешность - это погрешность, существующая при нормальных условиях, которые указаны в нормативных документах, регламентирующих правила испытания и эксплуатации электроизмерительных приборов.

Под нормальными условиями, например, могут пониматься: температура окружающей среды $(+20 \pm 2)^\circ\text{C}$;

положение прибора горизонтальное, с отклонением от горизонтального не превышающим $\pm 2^\circ$; относительная влажность $(65 \pm 15)\%$; практическое отсутствие внешних магнитных и электрических полей; частота питающей сети $(50 \pm 1) \text{ Гц}$ и так далее.

Дополнительная погрешность возникает при отклонении условий испытания и эксплуатации прибора от нормальных.

Например, приведенная погрешность электронных измерительных приборов при нормальных условиях не превышает 1%. Если же температура окружающей среды лежит вне указанного в нормальных условиях диапазона, то приведенная погрешность может превышать 1%.

2.3 Класс точности. *Класс точности* электронных измерительных приборов - обобщенная метрологическая характеристика, определяемая пределами допустимых основной и дополнительной погрешностей.

Класс точности K стрелочных и самопищущих приборов, как правило, обозначается одним числом, равным максимально допустимому значению основной приведенной погрешности, выраженной в процентах:

$$K(\%) = \frac{\Delta}{x_d} 100 = \gamma 100$$

$$x_N \quad (10.)$$

Электронные измерительные приборы делятся на 8 классов точности: 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0.

Пример: Милливольтметр со шкалой до 50 мВ имеет класс точности $K = 0.5$. Определить максимальную абсолютную погрешность электронного измерительного прибора.

Решение:

Из (10) следует, что максимальная абсолютная погрешность при измерениях во всем диапазоне равна

$$\Delta = \frac{K \times X_N}{100} = \frac{0.5 \times 50}{100} = \pm 0.25 \text{ мВ}$$

2.4 Вариация. *Вариация* показаний электроизмерительного прибора - это наибольшая разность его показаний при одном и том же значении измеряемой величины.

Основной причиной вариации является трение в опорах подвижной части прибора.

Вариацию определяют, сравнивая показания электроизмерительного прибора, считанные один раз после установки требуемого значения измеряемой величины подходом снизу (со стороны меньших значений), а другой раз - подходом сверху (со стороны больших значений).

2.5 Цена деления. *Цена деления* электроизмерительных приборов численно равна изменению измеряемой величины, вызывающему перемещение указателя (стрелки) на одно деление.

При равномерной шкале цена деления равна отношению предела измерения электроизмерительного прибора x_m к числу делений шкалы n :

$$c = x_m/n$$

2.6 Предел измерения *Предел измерения* электроизмерительного приборы значение измеряемой величины, при котором стрелка прибора отклоняется до конца шкалы. Электроизмерительные приборы могут иметь несколько пределов измерения (многопредельные приборы). При измерениях такими приборами на различных пределах цена деления будет различна.

2.7 Чувствительность. *Чувствительность* S электроизмерительного прибора - это отношение изменения сигнала на выходе электроизмерительного прибора Δy к вызвавшему его изменению измеряемой величины Δx :

$$S = \Delta y / \Delta x \quad (12)$$

В общем случае чувствительность

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (13)$$

Следовательно, при нелинейной статической характеристике чувствительность зависит от x , а при линейной статической характеристике -чувствительность постоянна.

У электроизмерительных приборов при постоянной чувствительности шкала равномерная, то есть длина всех делений одинакова.

3 Измерение тока, напряжения и мощности

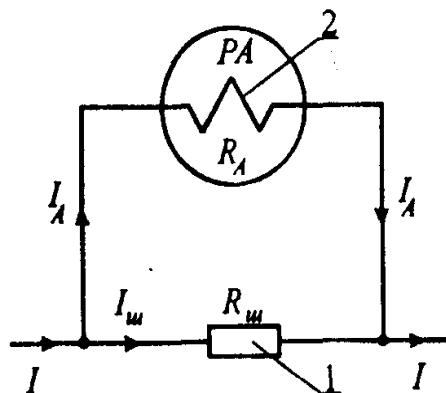
3.1 Измерение тока. Для измерения тока служат амперметры, миллиамперметры и микроамперметры. Эти приборы включаются последовательно в участок электрической цепи.

При этом необходимо, чтобы внутреннее сопротивление амперметра было мало по сравнению с сопротивлением участка электрической цепи, в которой он включен. В противном случае включение прибора вызовет существенное изменение сопротивления и тока на данном участке электрической цепи, а так же изменение режима работы всей цепи.

Сопротивления катушек (рамок) электроизмерительных приборов составляют 1 ... 2 кОм рассчитаны на полное отклонение стрелки при токе 100...500 мкД(что соответствует падению напряжения на приборе 0,1.-1 мВ). Следовательно, непосредственное включение электроизмерительного прибора возможно только при измерении малых токов до 500 мА в высокоомных электрических цепях.

Чтобы использовать данный прибор для измерения токов больших значений и снизить его внутреннее сопротивление применяют *шунты*.

Шунт представляет собой манганиновые пластины или стержни, впаянные в медные или латунные наконечники. Сопротивление шунта значительно меньше сопротивления рамки прибора. Шунт включается в электрическую цепь последовательно, а параллельно ему подключается рамки (катушка) прибора.



1 - шунт; 2 - рамка (катушка) прибора; I - измеряемый ток; I_ш - ток через шунт; I_A - ток через рамку прибора.

Рисунок 3 - Схема включения прибора с шунтом

По 1 закону Кирхгофа измеряемый ток в электрической цепи

$$I = I_A + I_{ш}$$

где I_A - ток через рамку прибора, А;

I_ш - ток через шунт, А.

Так как r_A >> r_ш, то I_A << I_ш, так что I_ш = I.

При параллельном соединении I_A x r_A = I_ш x r_ш или

$$I_A / I_{ш} = r_{ш} / r_A$$

$$r_{ш} = \frac{r_A}{n - 1}, \quad (6.14)$$

I

где n = ----- - коэффициент шунтирования.

I_A

Пример: Рамка прибора магнитоэлектрической системы имеет сопротивление r_A = 1500 Ом и рассчитана на максимальное отклонение при токе I = 250 мА. Определить сопротивление шунта r_ш для измерения токов до 50 мА. **Решение:**

1. Определим коэффициент шунтирования :

$$n = \frac{I}{I_A} = \frac{50 \times 10^{-3}}{250 \times 10^{-6}} = 200$$

2. Определяем сопротивление шунта

$$r_{\text{ш}} = \frac{r_A}{n-1} = \frac{1500}{200-1} = 7,54 \text{ Ом}$$

В амперметрах, предназначенных для измерения токов до 100 А, шунты вмонтированы в корпус прибора и присоединены к контактным выводным зажимам.

В амперметрах, предназначенных для измерения токов более 100 А, шунты делаются наружными и присоединяются к ним при помощи специальных калиброванных проводников, так как иначе распределение токов будет неправильным.

Для расширения пределов измерения амперметров в цепях синусоидального (переменного) тока применяются *трансформаторы тока*, которые служат для преобразования больших токов в малые.

Первичная обмотка трансформатора тока, состоящая из малого числа витков, включается последовательно в цепь с измеряемым током.

Вторичная обмотка состоит из большого числа витков и в нее включаются измерительные приборы (амперметры), изолированные от высоковольтных и сильноточных проводов.

На паспорте в виде дроби указывается коэффициент трансформации трансформатора тока:

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

где I_1 - ток первичной обмотки, А;

I_2 - ток вторичной обмотки, А;

w_1 - число витков первичной обмотки;

w_2 - число витков вторичной обмотки.

Например, $100/5$ А означает, что данный трансформатор тока рассчитан на первичный ток 100 А и вторичный ток - 5 А. Коэффициент трансформации этого трансформатора $K = 100/5 = 20$.

Зная K и получив показания амперметра во вторичной цепи трансформатора тока I_2 можно определить первичный ток

$$I_1 = K I_2$$

Большинство трансформаторов тока выпускаются с номинальным вторичным током 5 А.

3.2 Измерение напряжения. Для измерения напряжения служат вольтметры. Они подключаются параллельно участку, на котором необходимо измерить напряжение.

Внутреннее сопротивление вольтметра должно быть значительно больше сопротивления участка, к которому он подключается, так как в противном случае вольтметр будет оказывать влияние на токораспределение в электрической цепи и результаты измерения будут содержать большую погрешность.

Для расширения пределов измерений вольтметров последовательно с ними включают *добавочные сопротивления*.

В приборах на напряжение до 300 В, добавочные сопротивления вмонтированы в корпус приборов или укреплены снаружи приборов.

Для измерения напряжений выше 300 В добавочные сопротивления присоединяют к одному из выводных зажимов прибора.

Добавочные сопротивления рассчитывают так, чтобы в цепи с увеличенным напряжением по обмотке (рамке) вольтметра проходил тот же ток, что и при номинальном напряжении, на которое рассчитана обмотка.

Обмотка рассчитана на ток

$$I_V = U/r_V,$$

где I_V - ток, протекающий через рамку вольтметра, А;

U - напряжение на рамке, В;

r_V - сопротивление рамки, Ом.

При увеличении напряжения в цепи в n раз, ток I_V должен оставаться прежним

$$I_V = \frac{nU}{r_V + r_{\text{доб}}r_V}$$

Отсюда

$$r_{\text{доб}} = r_V \times (n - 1) \quad (14)$$

Пример. Вольтметром на 15 В необходимо измерить напряжение 150 В. Определить добавочное сопротивление, если внутреннее сопротивление вольтметра 900 Ом.

Решение:

1. Определим отношение измеряемого напряжения к напряжению вольтметра

$$n = 150/15 = 10$$

2. Добавочное сопротивление

$$r_{\text{доб}} = r_V \times (n - 1) = 900 \times 9 = 8100 \text{ Ом}$$

Для измерения высоких напряжений синусоидального тока применяют трансформаторы напряжения.

Первичная обмотка трансформатора напряжения включается параллельно потребителю и имеет большое число витков.

В паспорте трансформатора напряжения указывается отношение напряжений первичной и вторичной обмоток. Например 5000/100 означает, что номинальное напряжение первичной обмотки 5000 В, вторичной - 100 В.

Коэффициент трансформации напряжения

$$K = 5000/100 = 50$$

Зная K и напряжение вторичной обмотки U_2 , можно определить первичное напряжение:

$$U_1 = KU_2$$

Большинство трансформаторов напряжения выпускается с номинальным вторичным напряжением 100 В.

3.3 Измерение мощности электрического тока. Для измерения мощности в цепях постоянного и в цепях синусоидального тока промышленной частоты применяются ваттметры, обеспечивающий непосредственный отсчет мощности по шкале.

Ваттметр электродинамической системы состоит из двух катушек (рамок):

- неподвижной, токовой из толстого провода, включаемой последовательно с потребителем;
- подвижной обмотки напряжения, выполненной из тонкого провода и включаемой параллельно потребителю.

При постоянном токе вращающий момент электродинамического прибора пропорционален произведению токов в его обмотках:

$$M_{bp} = kI_h I_n$$

где I_h - ток в неподвижной катушке, А;

I_n - ток в подвижной катушке, А.

В ваттметре ток подвижной обмотки прямо пропорционален приложенному напряжению

$$I_n = U/R_n$$

где R_n - сопротивление подвижной катушки, Ом.

Следовательно, вращающий момент прямо пропорционален мощности. Поэтому электродинамический ваттметр имеет равномерную шкалу, то есть.

$$M_{bp} = kI_h U/R_n = kP$$

Вращающий момент электродинамического прибора, включенного в цепь синусоидального тока

$$M_{bp} = kI_h I_n \cos\phi$$

то есть показания ваттметра пропорциональны току, напряжению и $\cos\phi$, то есть активной мощности цепи P .

Ваттметр имеет четыре зажима, к двум выводится токовая обмотка, к другим двум - обмотка напряжения. Первая пара зажимов включается в измеряемую цепь последовательно, вторая - параллельно. Начала обмоток обозначаются звездочками (*) и соединяются вместе. Это необходимо, чтобы токи в катушках пропускались в определенном направлении.

На шкале ваттметра указываются верхние пределы измерений тока и напряжения. Если, например на шкале ваттметра обозначено $I=5$ А и $U=100$ В, это значит, что верхний предел измерения ваттметра $P = 500$ Вт, то есть им можно измерять мощности до 500 Вт.

Очевидно, что цена деления ваттметра равна

$$c = P/n = IU/n$$

где n - число делений шкалы.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАНЯТИЯМ

4.1 Лабораторное занятие №1 «Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока»

Вопросы к занятию

1. Исследование законов Кирхгофа
2. Исследование принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока

При подготовке к занятию акцентировать внимание необходимо на условия применения первого и второго законов Кирхгоффа при расчете электрических цепей.

Лабораторное занятие №2 «Исследование цепи переменного тока с последовательным включением элементов

Вопросы к занятию

1. Ознакомиться со свойствами элементов электрической цепи синусоидального переменного тока.
2. Исследовать режимы работы неразветвленной цепи переменного тока при индуктивном и емкостном характере нагрузки.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на способах представления синусоидальной функции, понятии го действующего и среднего значения синусоидального тока и напряжения. Идеальный активный, индуктивный и емкостной элемент. Методика расчета цепи переменного тока с помощью комплексных чисел. Активная, реактивная и полная мощности. Коэффициент мощности

4.3 Лабораторное занятие №3 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при соединении потребителей звездой

Вопросы к занятию

1. Изучение режимов работы трехфазной цепи переменного тока при соединении потребителей звездой.
2. Изучение методики расчета трехфазной цепи синусоидального переменного тока при соединении потребителей звездой.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на способах соединения фаз генератора и нагрузки, методику расчета цепи трехфазного переменного тока при соединении нагрузки звездой с нейтральным проводом, звездой без нейтрального провода, треугольником.

4. 4 Лабораторное занятие №4 «Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему

Вопросы к занятию

1. Изучить конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя с коротко замкнутым ротором.
2. Исследовать работу электродвигателя в нормальном и аварийных режимах.
3. Научиться маркировать выводы трехфазного асинхронного электродвигателя.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на вопросы теории асинхронных двигателей, подключение двигателя на напряжение 127/220 В. Пуск асинхронных двигателей.