

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

**Кафедра «Электротехнологии и электрооборудование»**

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

**Б1.Б.15 Электроника и электротехника**

**Направление подготовки (специальность) 20.03.01 Техносферная  
безопасность**

**Профиль образовательной программы «Безопасность  
жизнедеятельности в техносфере»**

**Форма обучения заочная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Организация самостоятельной работы .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Методические рекомендации по выполнению индивидуальных домашних задания .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Электрические цепи переменного тока с последовательным включением элементов.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Электрические цепи переменного тока со смешанным включением элементов.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Трехфазные электрические цепи переменного тока.....</b>	<b>25</b>
<b>3. Методические рекомендации по самостоятельному изучению вопросов</b>	
<b>3.1 Расчет магнитных цепей.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Методы расчета сложных электрических цепей постоянного тока .....</b>	<b>51</b>
<b>3.3 Резонанс напряжений.....</b>	<b>55</b>
<b>3.4 Резонанс токов.....</b>	<b>58</b>
<b>3.5 Уравнение намагничивающих сил трансформатора. Схема замещения трансформатора.....</b>	<b>59</b>
<b>3.6 Синхронные генераторы и синхронные двигатели.....</b>	<b>66</b>
<b>3.7. Электронные генераторы.....</b>	<b>68</b>
<b>3.8 Микропроцессоры.....</b>	<b>70</b>
<b>4. Методические рекомендации по подготовке к занятиям.....</b>	<b>81</b>
<b>4.1 Лабораторная работа 1,2 (ЛР – 1,2) Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов и методом наложения. Исследование сложной цепи постоянного тока с использованием законов Кирхгофа и метода контурных токов.....</b>	<b>81</b>
<b>4.2 Лабораторная работа 3 (ЛР – 3) Исследование цепи переменного тока с последовательным включением элементов.....</b>	<b>81</b>
<b>4.3 Лабораторная работа 4 (ЛР-4) Усилитель постоянного тока.....</b>	<b>82</b>
<b>4.4 Лабораторная работа 5 (ЛР-5) Двухполупериодный неуправляемый выпрямитель.....</b>	<b>82</b>
<b>4.5 Практическое занятие 1 (ПЗ-1). 2 часа Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов и методом наложения.....</b>	<b>82</b>

# 1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

## 1.1. 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.	<b>Модуль 1.</b> Основные определения и методы расчета линейных и нелинейных электрических цепей постоянного тока				<b>10</b>	
1.1.	<b>Модульная единица 1</b> Расчет простых цепей при последовательном, параллельном и смешанном включении элементов. Законы Кирхгофа..					
1.2.	<b>Модульная единица 2</b> <b>Методы расчета сложных электрических цепей постоянного тока.</b>				2	
1.3	<b>Модульная единица 3</b> Электромагнетизм.				8	
2	<b>Модуль 2.</b> Синусоидальный переменный электрический ток.			<b>10</b>	<b>10</b>	
2.1	<b>Модульная единица 1</b> Цепи однофазного переменного тока			5	10	
2.2	<b>Модульная единица 2</b> Цепи трехфазного переменного тока			5		
3	<b>Модуль 3 .</b> Электромагнитные устройства, электрические машины, основы электропривода и электроснабжения			<b>10</b>	<b>10</b>	
3.1	<b>Модульная единица 1</b> Трансформаторы.				5	
3.2	<b>Модульная единица 2</b> Асинхронные машины переменного тока. Синхронные машины. Машины постоянного тока				5	

4	Модуль 4 Основы электроники. Электроизмерения			19	10	
4.1	Модульная единица 1 Полупроводниковые приборы.				5	
4.2	Модульная единица 2 Микропроцессоры.				5	
4.3	Модульная единица 3 Электроизмерения			19		

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ

Индивидуальные домашние задания выполняются в форме контрольной работы

### 2.1 Электрические цепи переменного тока с последовательным включением элементов

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

**Задание.** 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.

Таблица 1

#### Варианты задачи

Ва р. №	Ри с. №	U, В	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
			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	1.1 0	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	1.1 0	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	1.1 0	280	36	55	-	35	82	44	250	-	-

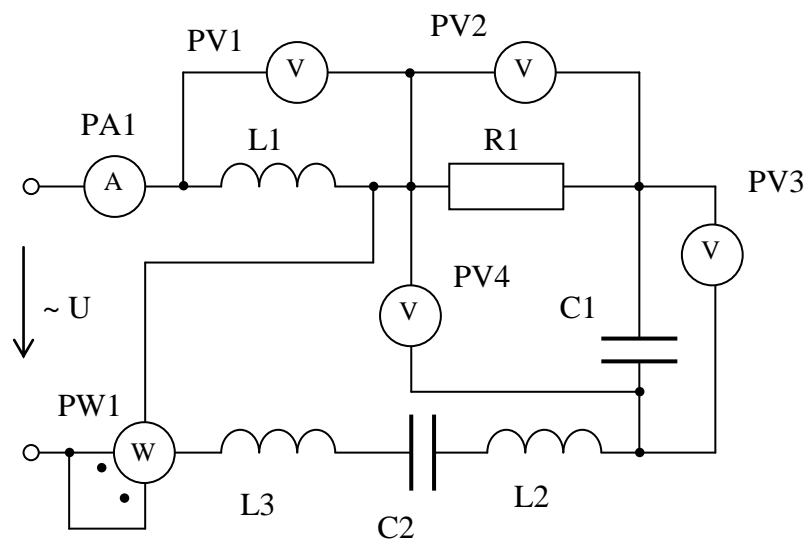


Рис. 1.1

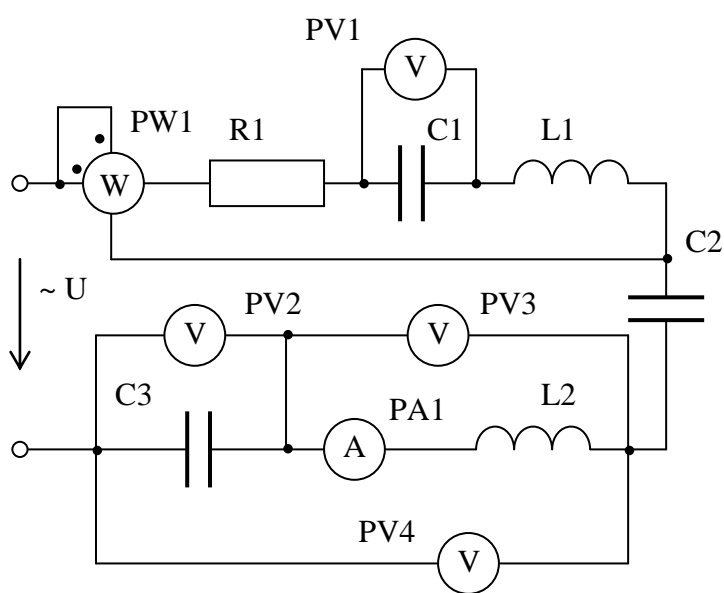


Рис. 1.2

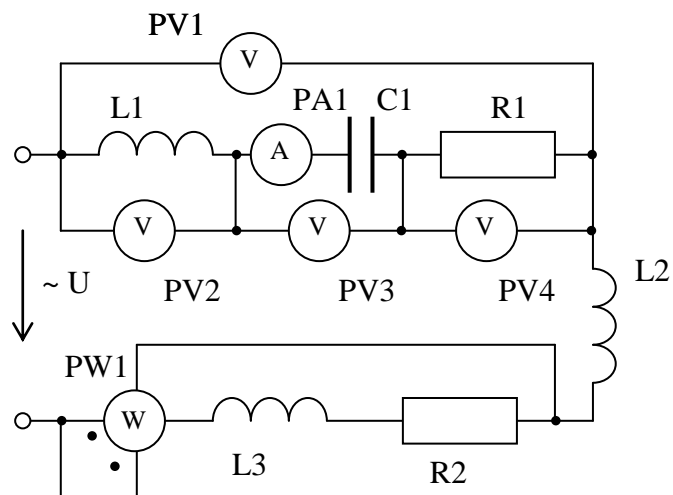


Рис. 1.3

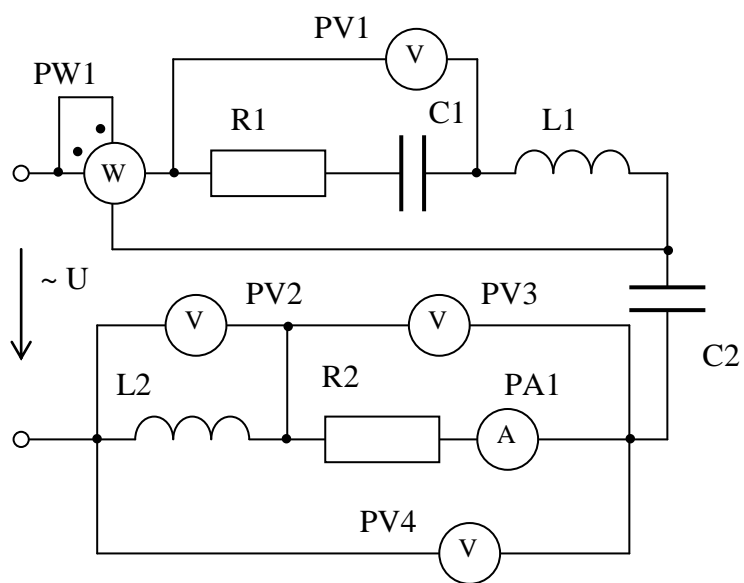


Рис. 1.4

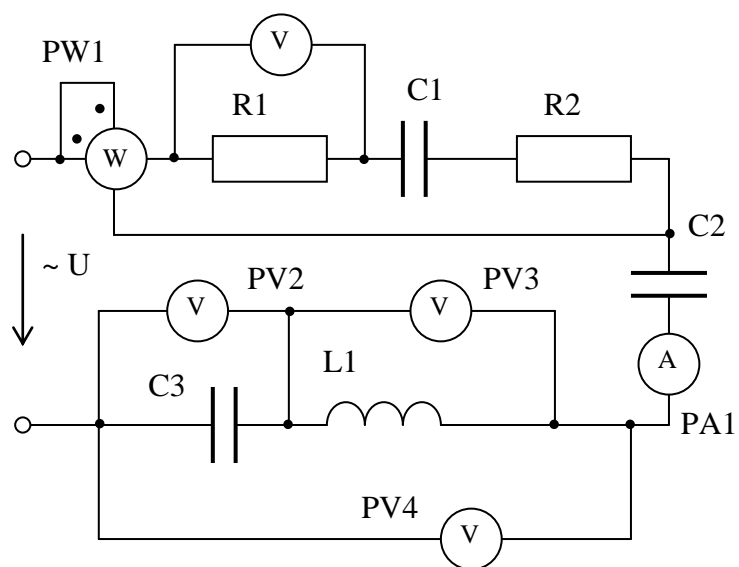


Рис. 1.5

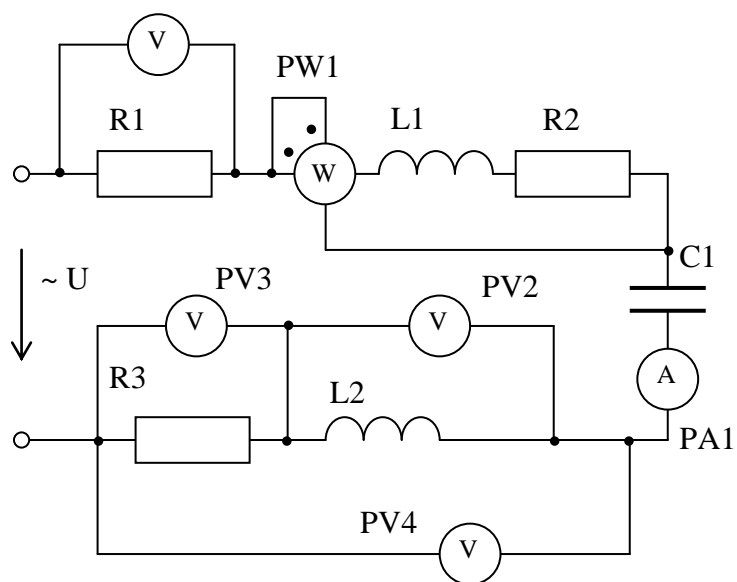


Рис. 1.6



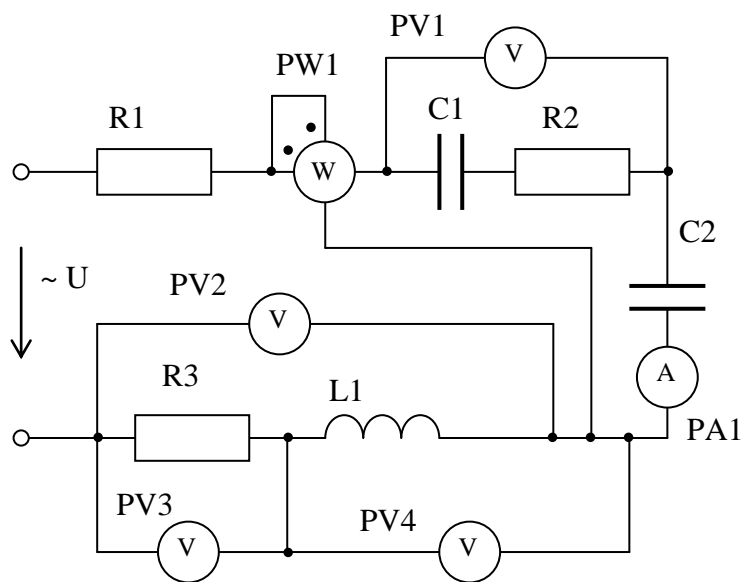


Рис. 1.7

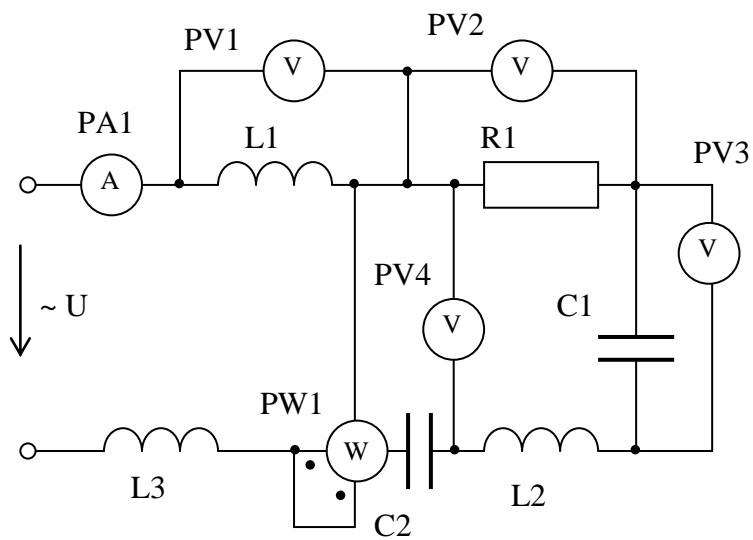


Рис. 1.8

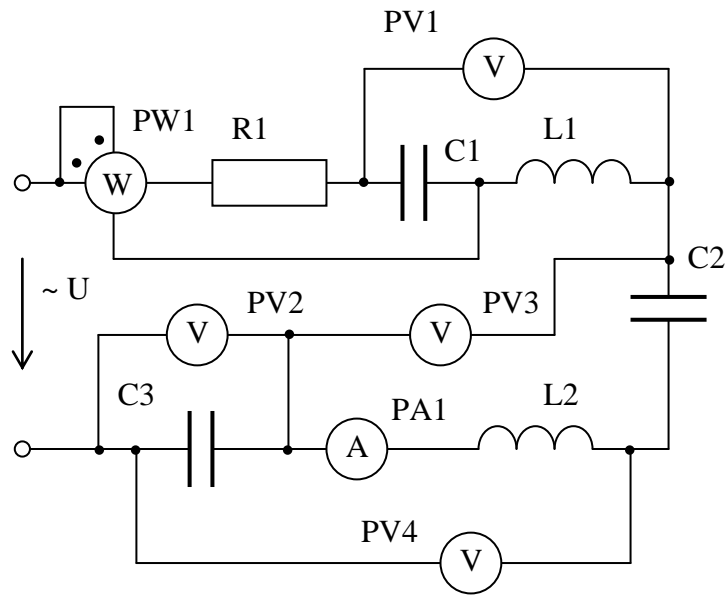


Рис. 1.9

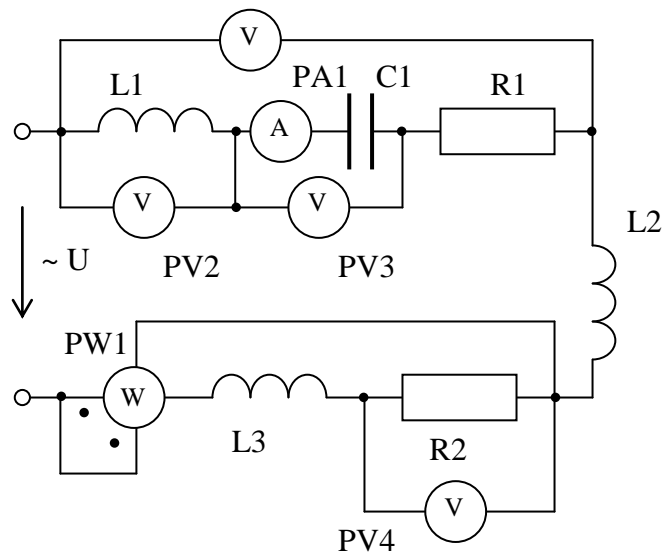


Рис. 1.10

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

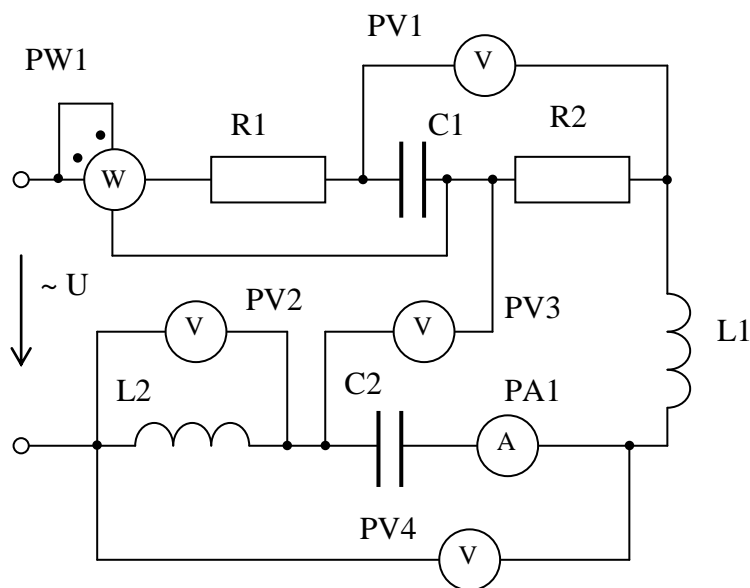


Рис. 1.11

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

$U=200$  В,  $f=50$  Гц,  $R_1=18$  Ом,  $R_2=52$  Ом,

$L_1=180$  мГн,  $L_2=40$  мГн,  $C_1=300$  мкФ,  $C_2=150$  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

$$X_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 180 \cdot 10^{-3} = 56,5 \text{ Ом}$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 314 \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 12,6 \text{ Ом}$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{314 \cdot 300 \cdot 10^{-6}} = 10,6 \text{ Ом}$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 150 \cdot 10^{-6}} = 21,2 \text{ Ом}.$$

Определяем общее активное сопротивление всей цепи

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

Определяем общее реактивное сопротивление всей цепи

$$\begin{aligned} X_{o6} &= X_{L1} + X_{L2} - X_{C1} - X_{C2} = \\ &= 56,5 + 12,6 - 10,6 - 21,2 = 37 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Рассчитываем полное сопротивление всей цепи

$$Z_{o6} = \sqrt{R_{o6}^2 + X_{o6}^2} = \sqrt{70^2 + 37^2} = 79 \text{ Ом}.$$

Определяем силу тока цепи (показание амперметра РА1)

$$I = \frac{U}{Z_{o6}} = \frac{200}{79} = 2,52 \text{ А}.$$

Определяем полную мощность всей цепи

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

Определяем коэффициент мощности всей цепи

$$\cos\varphi = \frac{R_{o6}}{Z_{o6}} = \frac{70}{79} = 0,88.$$

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

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

## 2.2 Электрические цепи переменного тока со смешанным включением элементов

### 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. №	Рис. №	U, В	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
			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	2.10	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	-	-	-
19	2.10	205	-	75	95	130	85	65	-	-	-
20	2.9	195	90	80	70	190	85	95	-	-	-
21	2.10	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	2.10	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	-

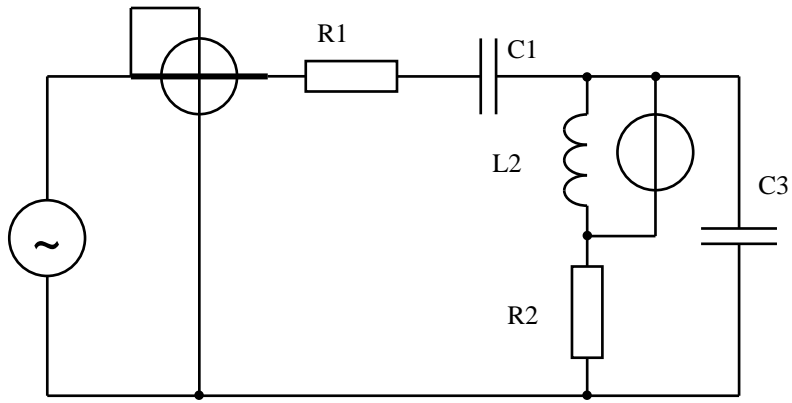


Рис. 2.1

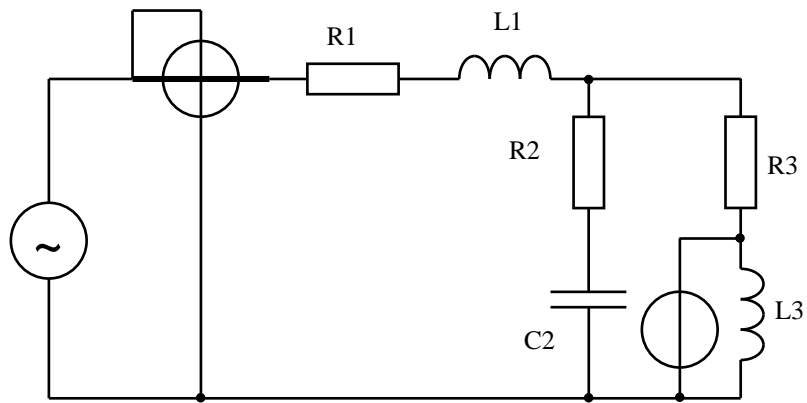


Рис. 2.2

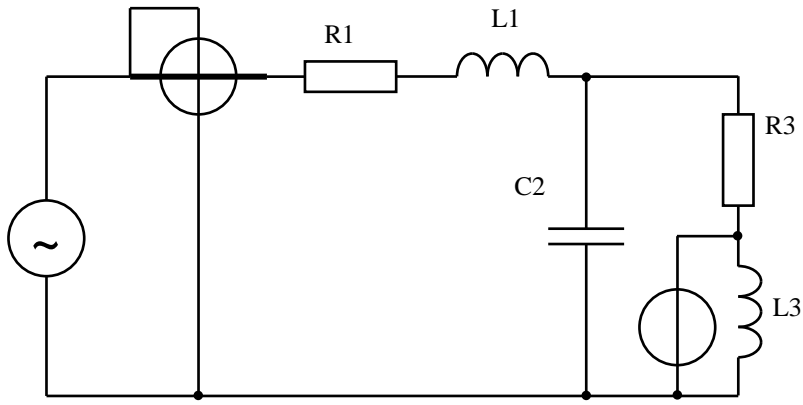


Рис. 2.3

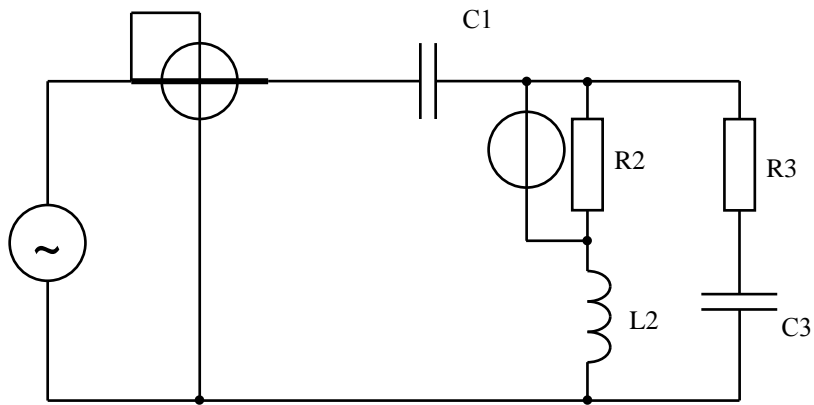


Рис. 2.4



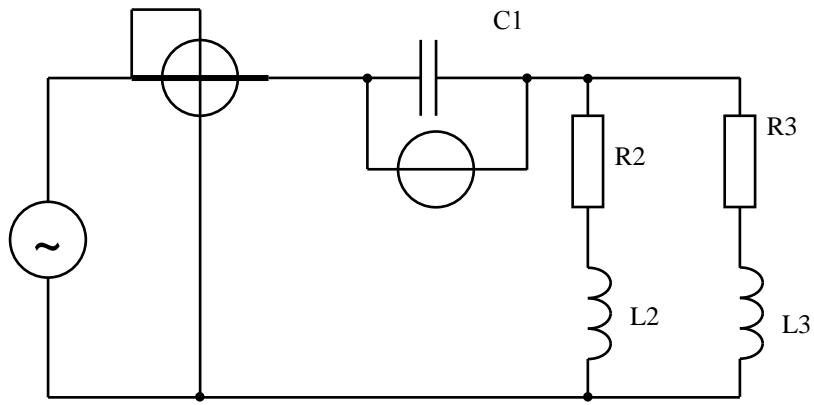


Рис. 2.5

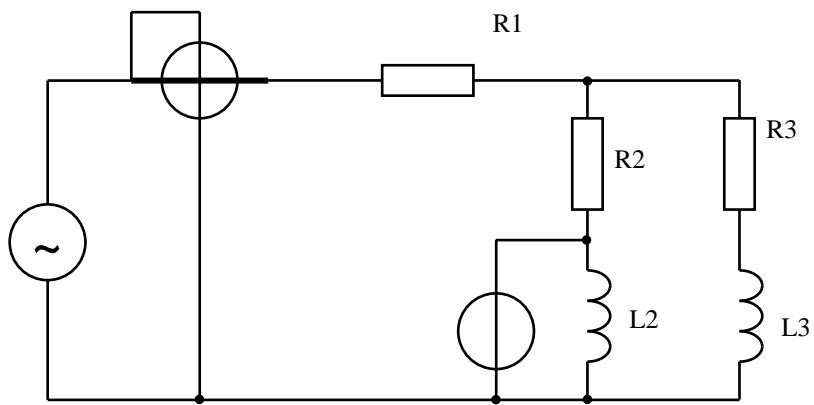


Рис. 2.6

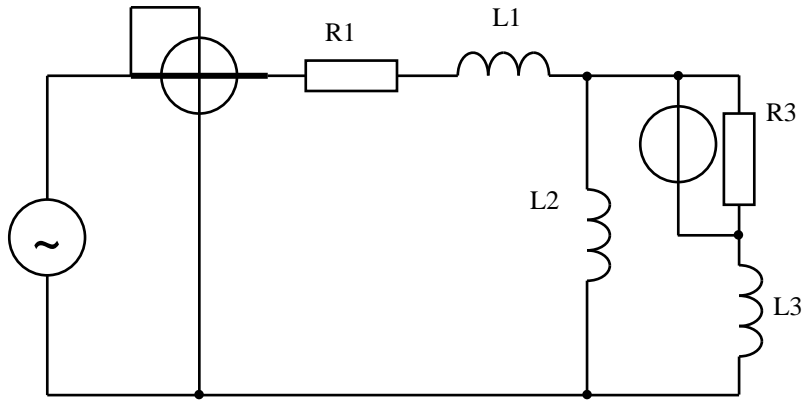


Рис. 2.7

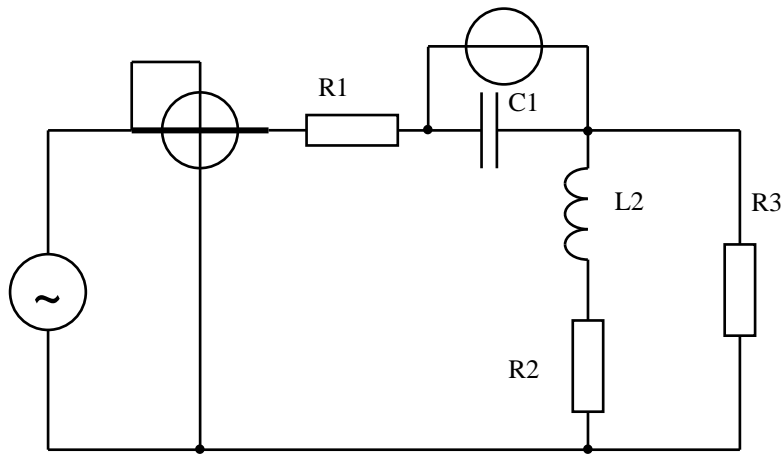


Рис. 2.8

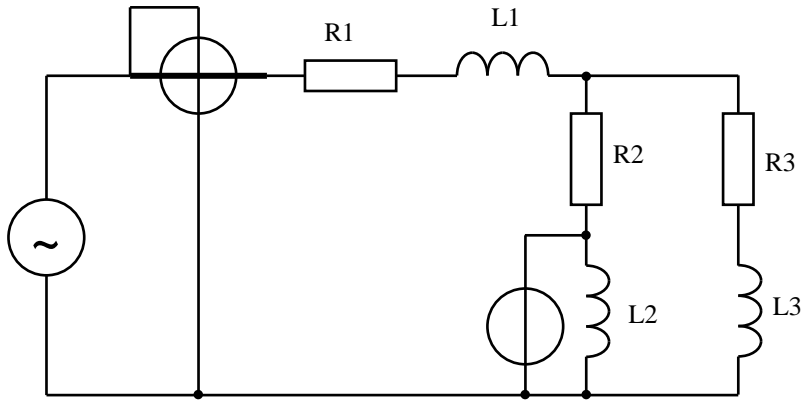


Рис. 2.9

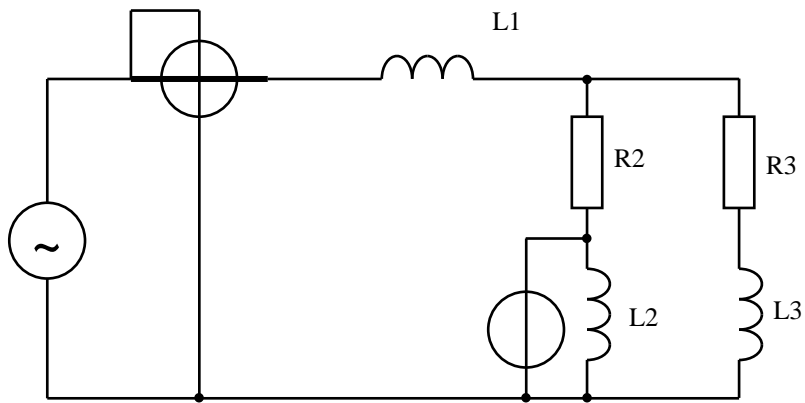


Рис. 2.10

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

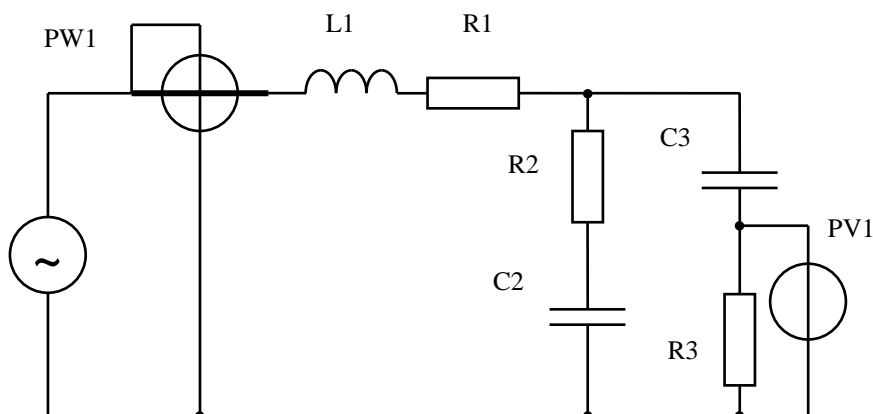


Рис. 2.11

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

$U=220$  В,  $f=50$  Гц,  $R_1=78$  Ом,  $R_2=43$  Ом,  $R_3=61$  Ом,  
 $L_1=180$  мГн,  $C_2=40$  мкФ,  $C_3=58$  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

$$X_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 180 \cdot 10^{-3} = 56,5 \text{ Ом}$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 79,6 \text{ Ом}$$

$$X_{C3} = \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{314 \cdot 58 \cdot 10^{-6}} = 54,9 \text{ Ом}.$$

Рассчитываем реактивные сопротивления участков цепи

$$X_1 = X_{L1} - X_{C1} = 56,5 - 0 = 56,5 \text{ Ом}$$

$$X_2 = X_{L2} - X_{C2} = 0 - 79,6 = -79,6 \text{ Ом}$$

$$X_3 = X_{L3} - X_{C3} = 0 - 54,9 = -54,9 \text{ Ом}.$$

Определяем полное сопротивление каждого участка

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{78^2 + 56,5^2} = 96,3 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} = \sqrt{43^2 + (-79,6)^2} = 90,5 \text{ Ом}$$

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2} = \sqrt{61^2 + (-54,9)^2} = 82,1 \text{ Ом}.$$

Определяем активную проводимость второго и третьего участка

$$g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{43}{90,5^2} = 0,0052 \text{ См}$$

$$g_3 = \frac{R_3}{Z_3^2} = \frac{61}{82,1^2} = 0,0091 \text{ См}.$$

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

$$b_2 = \frac{X_2}{Z_2^2} = \frac{-79,6}{90,5^2} = -0,0097 \text{ См}$$

$$b_3 = \frac{X_3}{Z_3^2} = \frac{-54,9}{82,1^2} = -0,0082 \text{ См}.$$

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

$$Z_{23} = \frac{1}{y_{23}} = \frac{1}{0,0229} = 43,7 \text{ Ом}$$

$$R_{23} = g_{23} Z_{23}^2 = 0,0143 \cdot 43,7^2 = 27,3 \text{ Ом}$$

$$X_{23} = b_{23} Z_{23}^2 = -0,0179 \cdot 43,7^2 = -34,1 \text{ Ом}.$$

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 .

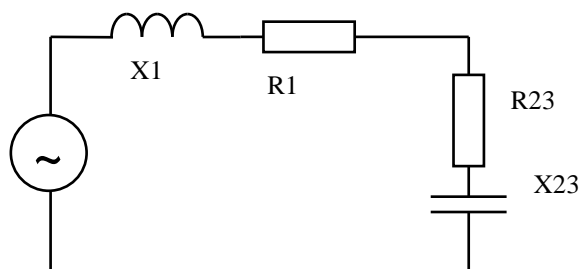


Рис. 2.12

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 Трехфазные электрические цепи переменного тока

### 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**

Ва р №	Рис №	U <sub>л</sub> , В	R <sub>a</sub>	R <sub>b</sub>	R <sub>c</sub>	X <sub>a</sub>	X <sub>b</sub>	X <sub>c</sub>	R <sub>ab</sub>	R <sub>bc</sub>	R <sub>ca</sub>	X <sub>ab</sub>	X <sub>bc</sub>	X <sub>ca</sub>
			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
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	-	-	-	-	-	-



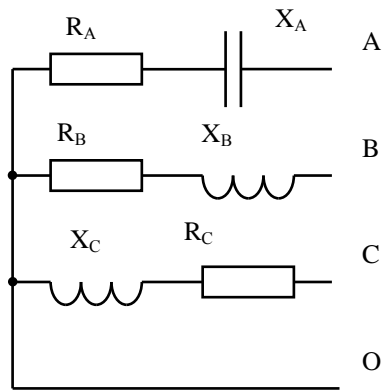


Рис. 3.1

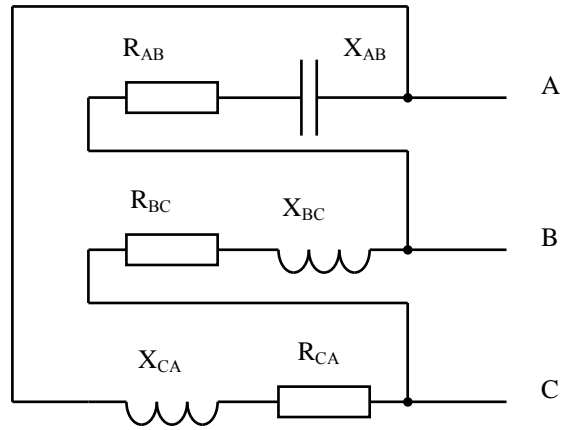


Рис. 3.2

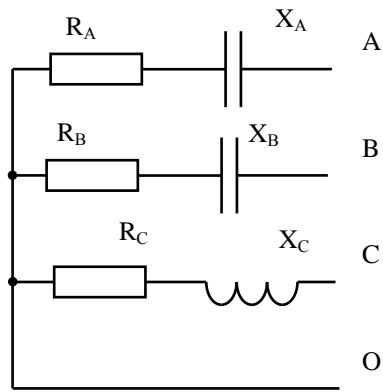


Рис. 3.3

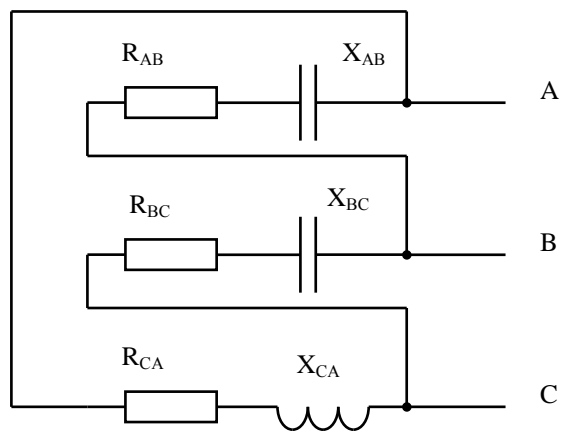


Рис. 3.4

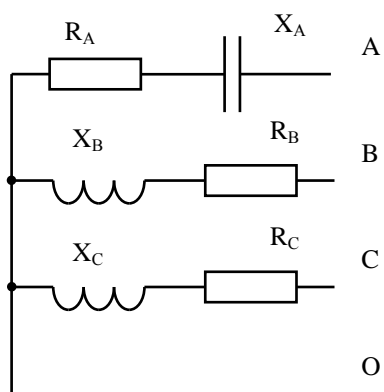


Рис. 3.5

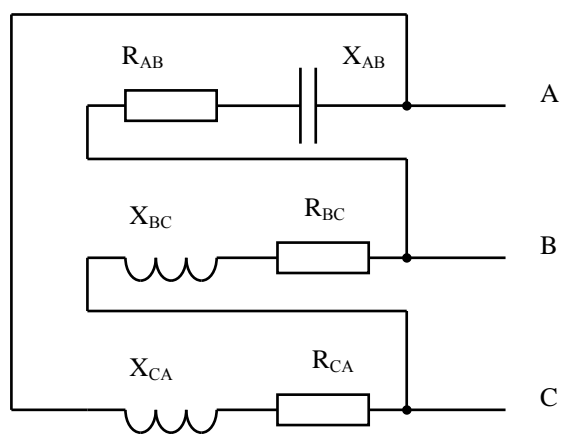


Рис. 3.6

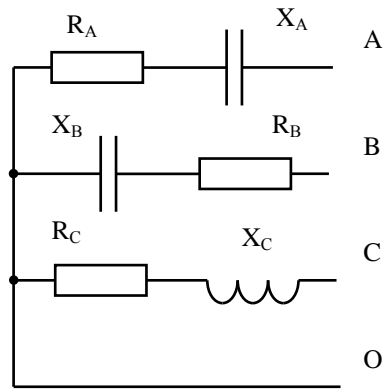


Рис. 3.7

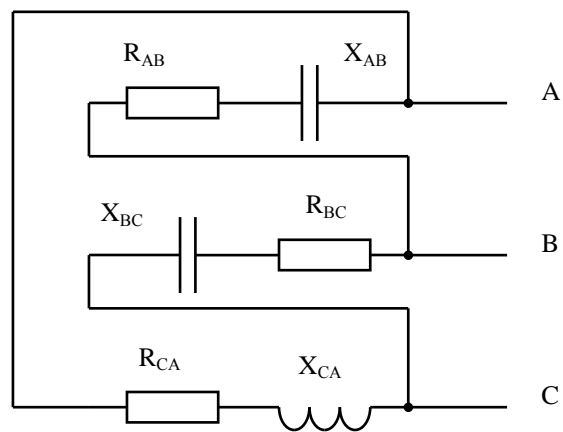


Рис. 3.8

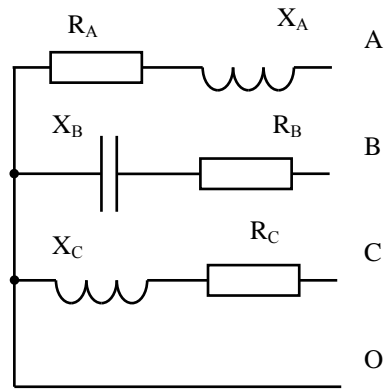


Рис. 3.9

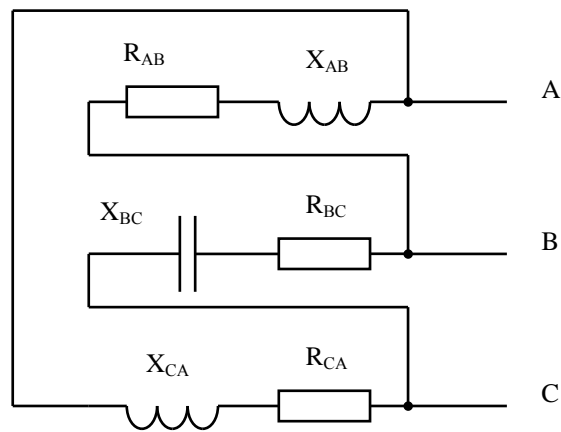


Рис. 3.10

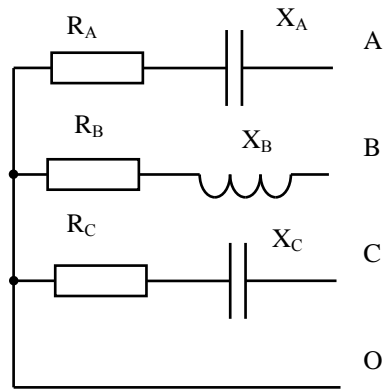


Рис. 3.11

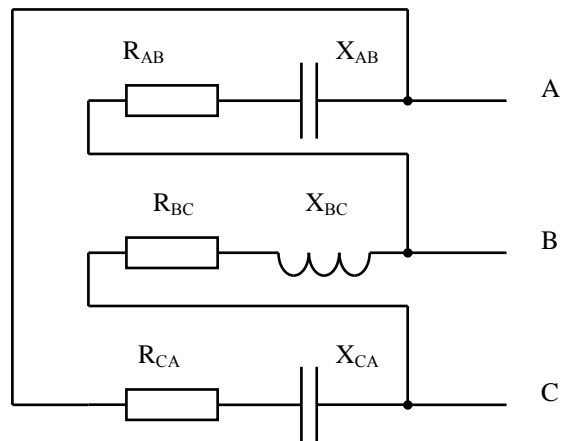


Рис. 3.12

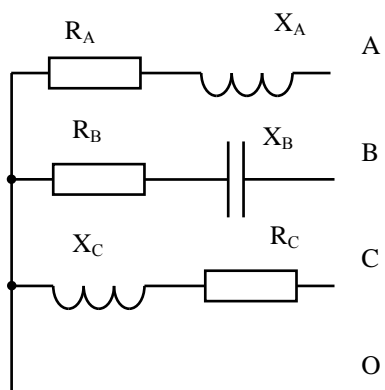


Рис. 3.13

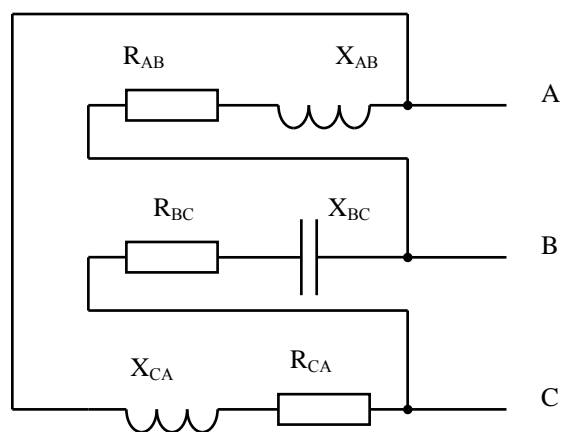


Рис. 3.14

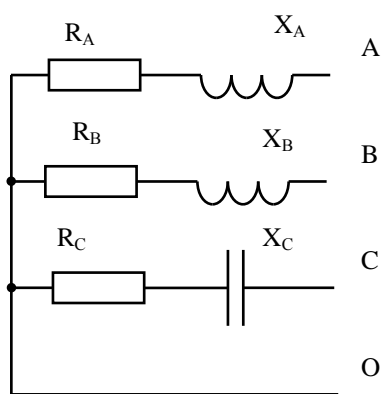


Рис. 3.15

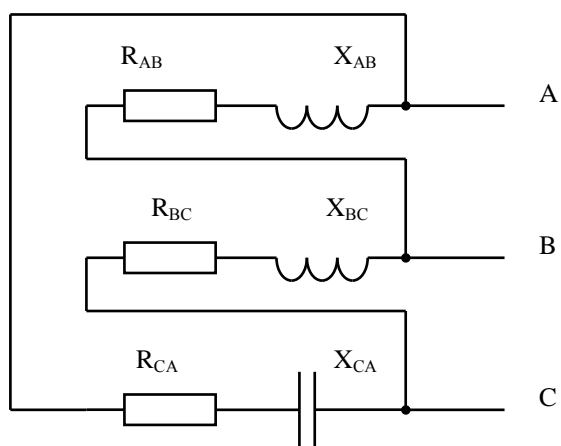


Рис. 3.16



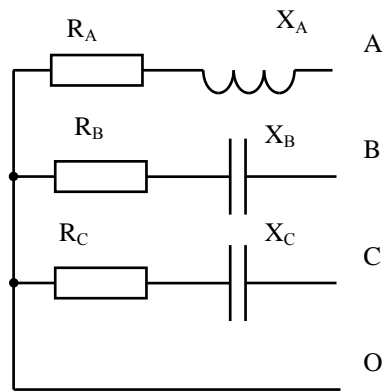


Рис. 3.17

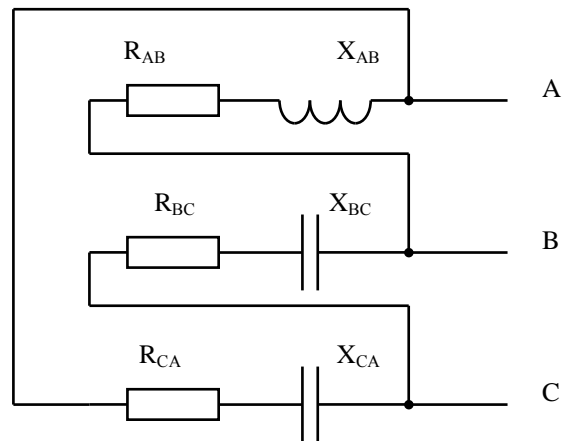


Рис. 3.18

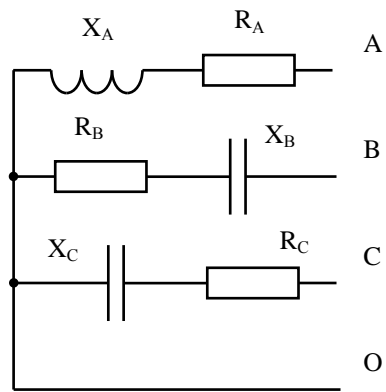


Рис. 3.19

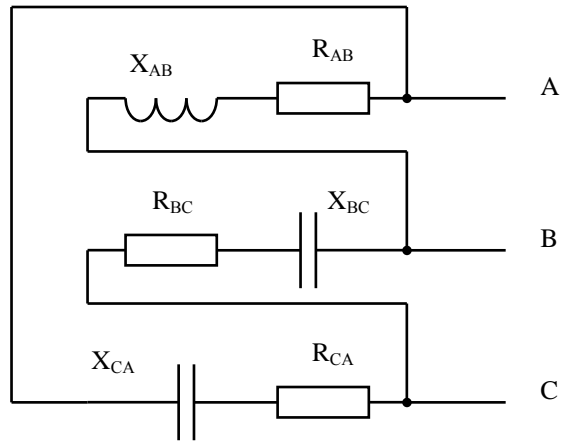


Рис. 3.20

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

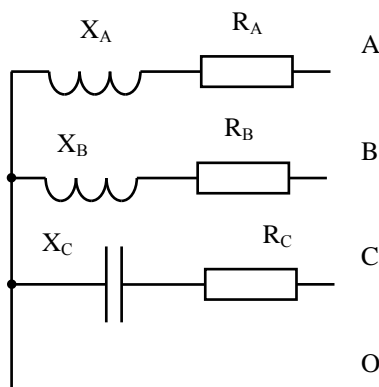


Рис. 3.21

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

$$U_A = U_{\phi} \cdot e^{j0^\circ} = 73 e^{j0^\circ} \text{ В};$$

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

$$U_C = U_{\phi} \cdot e^{j120^\circ} = 73 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

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

$$Z_A = R_A + jX_A = 14 + j25 = 28,7e^{j60,8^\circ} \text{ ом};$$

$$Z_B = R_B + jX_B = 28 + j14 = 31,3e^{j26,6^\circ} \text{ ом};$$

$$Z_C = R_C + jX_C = 26 - j11 = 28,2e^{-j22,9^\circ} \text{ ом}.$$

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

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{73e^{j0^\circ}}{28,7e^{j60,8^\circ}} = 2,56e^{-j61^\circ} \text{ А};$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B} = \frac{73e^{-j120^\circ}}{31,3e^{j26,6^\circ}} = 2,34e^{-j147^\circ} \text{ А};$$

$$I_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{73e^{j120^\circ}}{28,2e^{-j22,9^\circ}} = 2,6e^{j143^\circ} \text{ А}.$$

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

$$\tilde{S}_A = U_A \cdot I_A^* = 73,3e^{j0^\circ} \cdot 2,56e^{j61^\circ} = 187,6e^{j61^\circ} = 92 + j164 \text{ ВА}$$

$$\tilde{S}_B = U_B \cdot I_B^* = 73,3e^{-j120^\circ} \cdot 2,34e^{j147^\circ} = 171,5e^{j27^\circ} = 154 + j77 \text{ ВА}$$

$$\tilde{S}_C = U_C \cdot I_C^* = 73,3e^{j120^\circ} \cdot 2,6e^{-j143^\circ} = 190,6e^{-j23^\circ} = 175 - j74 \text{ ВА}.$$

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

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

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

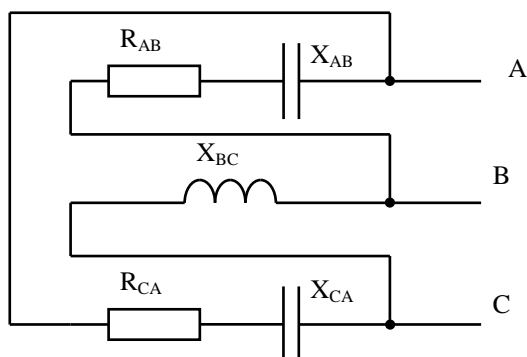


Рис. 3.22

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

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= U_{\phi} \cdot e^{j0^{\circ}} = 380 e^{j0^{\circ}} \text{ В}; \\ \dot{U}_{BC} &= U_{\phi} \cdot e^{-j120^{\circ}} = 380 e^{-j120^{\circ}} \text{ В}; \\ \dot{U}_{CA} &= U_{\phi} \cdot e^{j120^{\circ}} = 380 e^{j120^{\circ}} \text{ В}. \end{aligned}$$

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

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

Используя закон Ома для участка цепи, находим фазные токи

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

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

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

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

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

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

ОБРАЗЕЦ Таблица 1. Распределение заданий

Номер зачетной книжки	Номера вариантов								
01	1	8	16	24	32	40	48	56	64
02	3	11	19	27	35	43	51	59	67
03	2	10	18	26	34	42	50	58	66
04	5	13	21	29	37	45	53	61	69
05	4	12	20	28	36	44	52	60	68
03	7	15	23	31	39	47	55	63	71
07	6	14	22	30	38	46	54	62	70
08	9	17	25	33	41	49	57	65	72

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

#### 3.1 Расчет магнитных цепей (8 часов)

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на расчет неразветвленных и разветвленных магнитных цепей, расчет магнитных цепей с постоянной магнитодвижущей силой.

Всякий электромагнит состоит из стального сердечника – магнитопровода и намотанной на него катушки с витками изолированной проволоки, по которой проходит электрический ток.

Совокупность нескольких участков: ферромагнитных (сталь) и неферромагнитных (воздух), по которым замыкаются линии магнитного потока, составляют магнитную цепь.

#### Закон полного тока

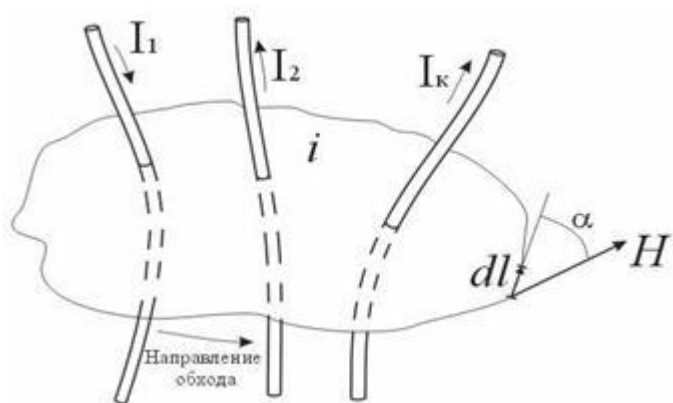
В основе расчета магнитных цепей лежит закон полного тока

$$\oint \vec{H} d\vec{L} = \oint H \cos \alpha dL = \sum I,$$

где:  $H$  – напряженность магнитного поля в данной точке пространства;  
 $dL$  – элемент длины замкнутого контура  $L$ ;

$\alpha$  – угол между направлениями векторов  $\vec{H}$  и  $d\vec{L}$ ;

$\square I$  – алгебраическая сумма токов, пронизывающих контур  $L$ .

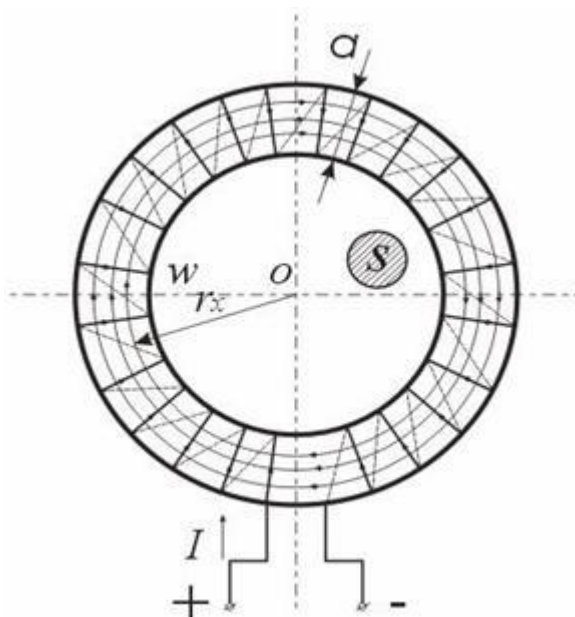


### Закон полного тока

Ток  $I_k$ , пронизывающий контур  $L$  считается положительным, если принятое направление обхода контура и направление этого тока связаны правилом правоугового винта (буравчика).

Применение закона полного тока для расчета магнитных цепей

Рассмотрим простейшую магнитную цепь, выполненную в виде кольца тороида из однородного материала (рис. 4.4).



### Кольцевая магнитная цепь

Обмотка имеет  $W$  витков и обтекается током  $I$ . Магнитные линии внутри кольца представляют собой концентрические окружности с центром в точке  $O$ . Применим к контуру  $C_x$ , совпадающему с одной из магнитных линий, проходящих в магнитопроводе, закон полного тока. При этом будем считать:



1.  $\vec{H}$  и  $d\vec{L}$  совпадают, следовательно  $\alpha = 0$ ;
2. величина  $H_x$  во всех точках контура одинакова;
3. сумма токов, пронизывающих контур, равна  $IW$ .

Тогда

$$\oint H_x \cos \alpha dL = H_x \oint dL = H_x L_x = IW$$

Отсюда

$$H_x = \frac{IW}{L_x} = \frac{IW}{2\pi r_x} \text{ [A/м]},$$

где  $L_x$  – длина контура, вдоль которого велось интегрирование;

$r_x$  – радиус окружности.

Вектор  $\vec{H}$  внутри кольца зависит от расстояния  $r_x$ . Если  $a$  – ширина кольца  $\ll d$ , то эта разница между значениями  $H$  в пределах сердечника не велика. При этом в расчет допустимо принять для всего поперечного сечения магнитопровода одно значение напряженности магнитного поля:

$$H_{cp} = IW / L ,$$

где  $L$  – длина средней магнитной линии.

Закон Ома для магнитной цепи. Линейные и нелинейные магнитные сопротивления

В кольцевом магнитопроводе с равномерной обмоткой все поле концентрируется внутри кольца.

Определим в этом случае магнитный поток в магнитопроводе с распределенной обмоткой.

Исходя из соотношений  $\Phi = B_{cp} S$  и  $B_{cp} = \mu_a H_{cp}$  получим

$$\Phi = B_{cp} S = \mu_a H_{cp} S .$$

(\*)

$$\Phi = \mu_a S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_a S}} = \frac{F}{R_m} .$$

Магнитный поток  $\Phi$  зависит от произведения  $IW = F$ , которое получило название магнитодвижущей силы (МДС).

Величину  $L / (\mu_a S) = R_m$  – принято назвать магнитным сопротивлением магнитопровода (по аналогии с электрическим сопротивлением  $r = L / \gamma S$ ).

Магнитное сопротивление воздуха (зазоров) линейное, т.к.  $\mu_a = \mu_o = \text{const}$ . Магнитное сопротивление сердечника нелинейно –  $\mu_a$  зависит от  $B$ .

Если намагничивающую силу  $F$ , уподобить действию ЭДС, будет получено соотношение, похожее на выражение закона Ома для цепи постоянного тока. В связи с этим формулу (\*) принято назвать законом Ома для магнитной цепи. Следует оговориться, что эта аналогия – формальная, а физическая сущность процессов в электрических и магнитных цепях различна.

В расчетах магнитных цепей различают прямую и обратную задачи.

#### Прямая задача

Задано: 1) геометрические размеры магнитной цепи; 2) характеристика  $B = f(H)$  (кривая намагничивания) ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь; 3) магнитный поток  $\Phi$ , который надо создать в магнитной цепи. Требуется найти намагничивающую силу обмотки  $F = IW$ . Решение задачи рассматривается применительно к магнитопроводу, представленному на рис. 4.7.



4. Значения  $H_1$  и  $H_2$  определяют по известным величинам магнитной индукции  $B$  с помощью кривых намагничивания, соответствующих ферромагнитных материалов.

А для воздушного зазора

$$H_{\text{воз}} = \frac{B_{\text{воз}}}{\mu_0} = \frac{B_{\text{воз}}}{4\pi \times 10^{-7}} = 8 \times 10^5 B_{\text{воз}} \text{ А/м.}$$

Обратная задача

Задано:

1. Геометрические размеры магнитной цепи;
2. Характеристики ферромагнитных материалов;
3. Намагничивающая сила обмотки  $F$ .

Требуется определить магнитный поток  $\Phi$ .

$$\Phi = \mu_a S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_a S}} = \frac{F}{R_m}$$

Непосредственное использование формулы

для

определения магнитного потока  $\Phi$  оказывается невозможным, поскольку магнитное сопротивление цепи переменное и само зависит от величины магнитного потока. Такие задачи решаются методом последовательного приближения в следующем порядке. Задаются рядом произвольных значений магнитного потока в цепи и для каждого из этих значений определяют необходимую намагничивающую силу обмотки так, как это делается при решении прямой задачи.

По полученным данным строят кривую  $\Phi(F)$  – вебер-амперную характеристику. Имея эту зависимость, нетрудно для заданного значения намагничивающей силы найти величину магнитного потока.

Для оценки необходимого значения  $\Phi$  можно пренебречь сопротивлением ферромагнитного участка и посчитать поток, который получится под действием намагничивающей силы  $F$  при сопротивлении воздушного участка. Это значение  $\Phi$  заведомо больше расчетного.

Остальные значения можно давать меньше.

$$\Phi = \frac{F}{R_{\text{м.воз}}} = \frac{F}{\frac{b}{S \times 4\pi \times 10^{-7}}}$$

Особенности расчета магнитных цепей с переменной магнитодвижущей силой

Физические процессы в цепях переменного тока, содержащих катушку со стальным сердечником, имеют ряд особенностей по сравнению с процессами в цепях постоянного тока. Эти особенности оказывают существенное влияние на конструктивное выполнение и технические характеристики электрических аппаратов и машин переменного тока.

Ферромагнитные элементы в цепях переменного тока имеют дополнительные потери в сердечнике на гистерезис и вихревые токи. Для снижения потерь стальной сердечник выполняют шихтованным из тонких изолированных друг от друга пластин.

#### Потери в сердечнике

Потери в сердечнике, называемые потерями в стали  $P_c$ , увеличиваются при повышении частоты питающего напряжения. Переменный магнитный поток  $\Phi$  индуцирует в стальном сердечнике вихревые токи (токи Фуко), замыкающиеся в плоскостях, перпендикулярных к оси потока. Эти токи вызывают нагрев стали, снижая тем самым к.п.д. и ограничивая нагрузочную способность электромагнитных устройств. Потери энергии в стальном магнитопроводе значительно снижаются при уменьшении толщины листа электротехнической стали (0,1 ÷ 0,5 мм)

$$P_B = k_B f^2 B_m^2 d^2 / \rho ,$$

где  $k_B$  – коэффициент, определяемый экспериментально;

$f$  – частота перемагничивания стали;

$B_m$  – максимальная магнитная индукция;

$d$  – толщина листа электротехнической стали сердечника;

$\rho$  – удельное сопротивление материала сердечника.

Помимо потерь от вихревых токов, в стальном магнитопроводе при переменном магнитном потоке возникают потери, обусловленные явлением гистерезиса

$$P_r = k_r f B_m^2 G ,$$

где  $k_r$  – постоянный коэффициент;

$G$  – вес сердечника в килограммах.

Суммарные потери от вихревых потоков и гистерезиса  $P_c = P_v + P_r$  [Вт] называют магнитными потерями или потерями в стали.

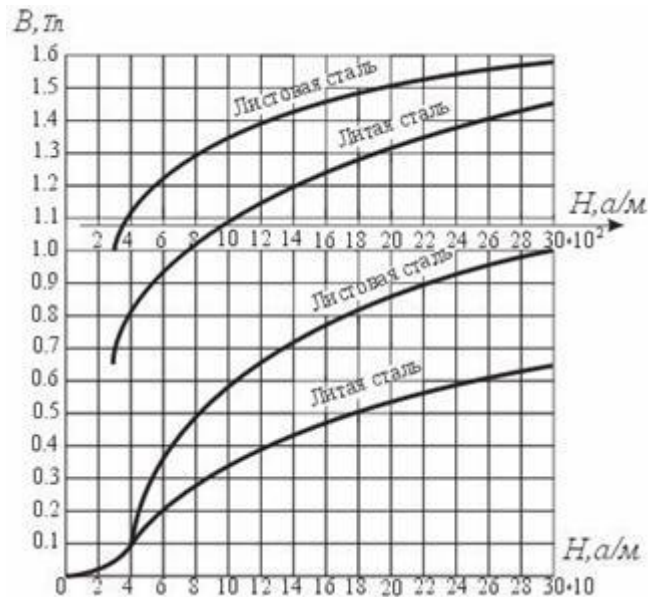
Векторная диаграмма и схема замещения катушки с сердечником

При расчете цепей с ферромагнитными элементами с синусоидальными источниками питания индуктивность  $L$  нельзя считать постоянной, и поэтому необходимо использовать зависимость между ЭДС и потокоцеплением или потоком. Форма кривой зависимости между потоком  $\Phi$  и намагничивающим током  $i$  подобна форме основной кривой намагничивания  $B(H)$ , т.к.  $\Phi = B S$ , а  $H = IW / L$ .

Нелинейный характер зависимости между  $\Phi$  и  $i$  приводит к тому, что индуктивность катушки  $L = W \Phi / i$  перестает быть величиной постоянной и зависит от величины намагничивающего тока.

При непостоянстве индуктивности  $L$  ЭДС самоиндукции  $e$ , наводимую в катушке переменным током  $i$  следует определять по формуле

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} .$$



### Зависимость $B(H)$

Если к катушке подведено синусоидальное напряжение  $u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$ , а активное сопротивление обмотки  $R \approx 0$ , то приложенное напряжение уравнивается только ЭДС самоиндукции:

$$u = -e,$$

$$U_m \sin(\omega t + \pi/2) = W d\Phi / dt.$$

Интегрируя это выражение, получим

$$\Phi = U_m / (2 \pi f) W \sin(\omega t) = \Phi_m \sin(\omega t).$$

Из полученного соотношения следует:

1. При синусоидальном напряжении на зажимах катушки магнитный поток  $\Phi$ , вызванный протекающим по цепи током  $I$ , тоже синусоидальный.

2. Заданному действующему значению напряжения  $U$  на зажимах катушки соответствует определенная амплитуда магнитного потока  $\Phi_m$  независимо от того, имеется ли у катушки стальной сердечник или же магнитный поток целиком замыкается по воздуху. Магнитный поток индуцирует в обмотке катушки ЭДС самоиндукции  $e$ , равную по величине приложенному напряжению и противоположную ему по направлению

$$e = -W d\Phi/dt = -W \Phi_m \omega \cos(\omega t) = 2 \pi f W \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2),$$

$$E_m = 2 \pi f W \Phi_m,$$

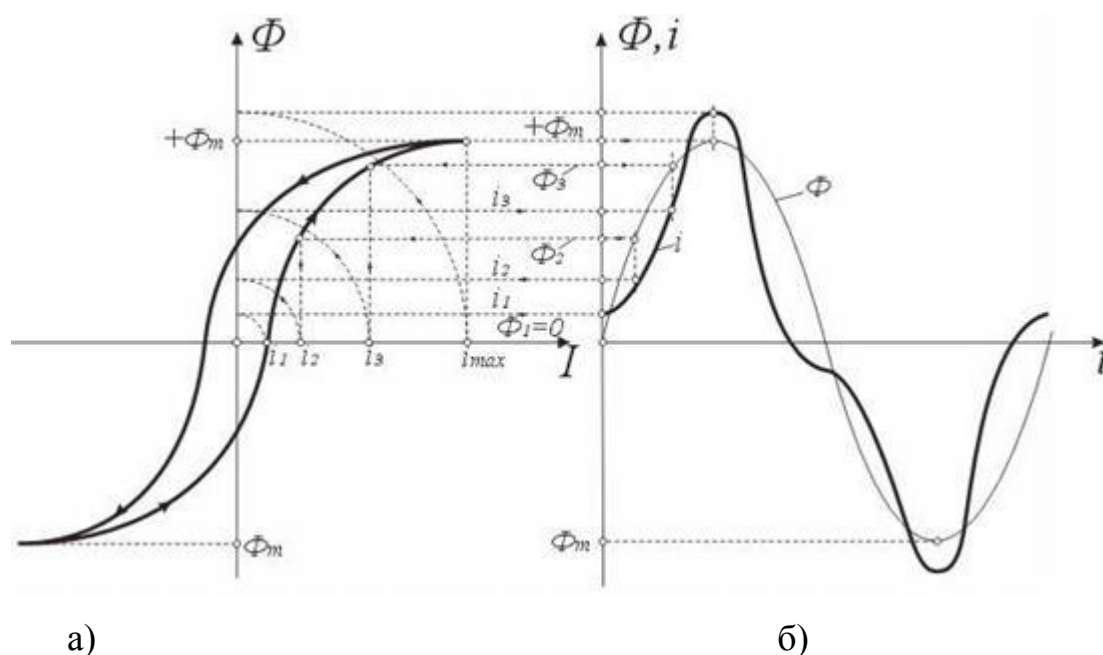
$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f W \Phi_m = 4,44 f W \Phi_m$$

При этом индуцируемая ЭДС  $E$  отстает от магнитного потока на четверть периода.

Выражение для действующей индуцированной ЭДС

$E = 4,44 f W \Phi_m$  часто используется при анализе работы и в практических расчетах и называется трансформаторной ЭДС.

Процесс намагничивания и размагничивания стального сердечника протекает по несовпадающим ветвям петли гистерезиса. График зависимости  $\Phi(i)$  при циклическом перемагничивании (рис. 4.9 а) имеет такую же форму, как и петля гистерезиса  $B(H)$ . На рис. 4.9 б изображен график синусоидального изменения магнитного потока во времени  $\Phi(t)$ .



Кривая перемагничивания (а) и кривые  $\Phi(t)$  и  $\Phi(i)$  для катушки со стальным сердечником

Располагая кривыми  $\Phi(i)$  и  $\Phi(t)$ , построим кривую намагничивающего тока  $i(t)$ .

Полученная кривая намагничивающего тока  $i(t)$  является несинусоидальной периодической функцией. Для упрощения анализа и расчета цепей переменного тока, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками, несинусоидальный намагничивающий ток заменяют



эквивалентным синусоидальным, опираясь на равенство действующих значений. Для построения расчетной схемы замещения катушки с сердечником запишем уравнение

$$u = -e + L_p di / dt + R i ,$$

где:  $R$  – сопротивление обмотки;

$L_p$  – индуктивность рассеяния.

Полное комплексное сопротивление запишется

$$\underline{Z} = R + R_o + i (x_p + x_o),$$

где:  $R_o$  – активное сопротивление, обусловлено потерями на вихревые токи и гистерезис;

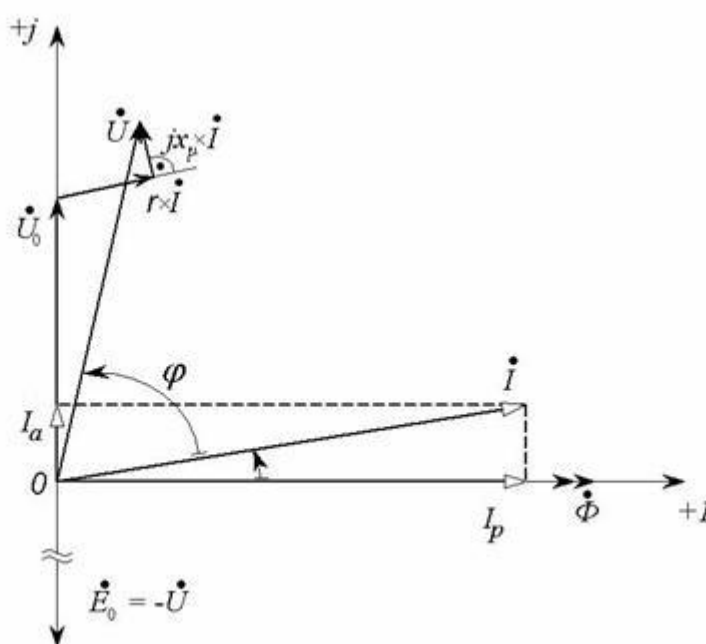
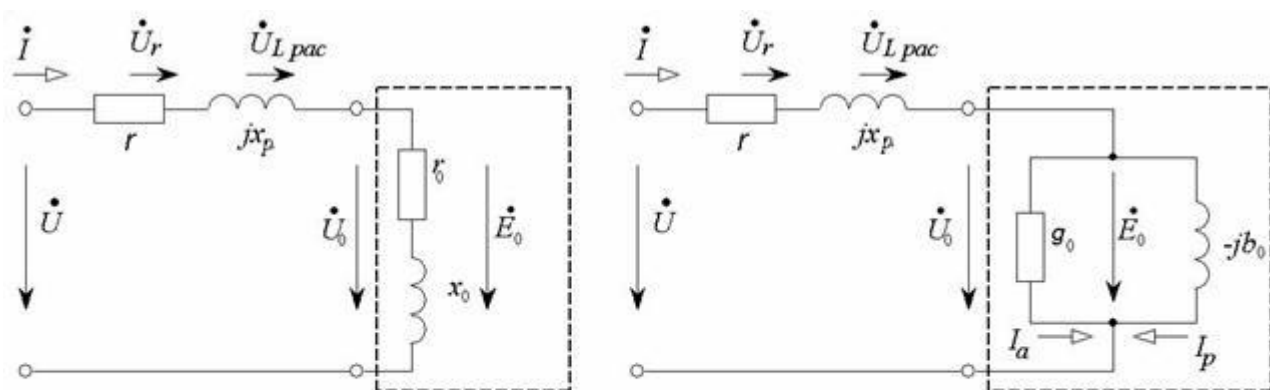
$x_o$  – индуктивное сопротивление, определяет мощность, необходимую на создание основного магнитного потока;

$R$  – сопротивление обмотки катушки;

$x_p$  – индуктивное сопротивление, определяет мощность потока рассеяния;

$R_o$  и  $x_o$  – нелинейные сопротивления.

Векторная диаграмма и а) последовательная, б) параллельная схемы замещения изображены на рисунке



Векторная диаграмма и соответствующие ей а) последовательная и б) параллельная схемы замещения

### 3.2 Методы расчета сложных электрических цепей постоянного тока.(2 часа)

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие положения:

Основными законами электрического состояния любой цепи являются **законы Ома и Кирхгофа**, Если цепь содержит один активный элемент (источник электрической энергии), то, в ряде случаев, расчет исходной схемы наиболее рационально вести с помощью метода преобразований и формулы «разброса». При этом нужно помнить, что во всех преобразованиях замена одних схем другими, им эквивалентными, не должна приводить к изменению токов или напряжений на участках цепи, которые не подверглись преобразованию (замена последовательно или параллельно соединенных сопротивлений эквивалентными, преобразование треугольника

сопротивлений в звезду, или наоборот). Для быстрого и правильного расчета электрических цепей с помощью **законов Кирхгофа** необходимо приобрести навыки в составлении уравнений на основании этих законов.

Линейную электрическую цепь любого вида можно также рассчитать **методом контурных токов** или **методом узловых потенциалов**. Если число взаимно независимых контуров  $n_k$  и число узлов  $n_y$  схемы связаны между собой неравенством  $n_k < n_y$ , то для расчета такой цепи пользуются *методом контурных токов*. В случаях, когда выполняется неравенство  $n_k > n_y$ , для расчета цепей рекомендуется применять *метод узловых потенциалов*.

Расчет линейных электрических цепей можно значительно упростить с помощью **принципа наложения** и **свойства взаимности**. В связи с этим пользуются входными и взаимными проводимостями ветвей. Важным свойством линейных электрических цепей является линейная связь между током и напряжением или между токами различных ветвей при изменении сопротивлений этих ветвей от нуля до бесконечности. Линейные соотношения можно с успехом применять при расчете цепей с изменяющимися параметрами.

Целью расчёта электрической цепи постоянного тока является определение некоторых параметров на основе исходных данных, из условия задачи. На практике используют несколько методов расчёта простых цепей. Один из них базируется на применении эквивалентных преобразований, позволяющих упростить цепь.

Под эквивалентными преобразованиями в электрической цепи подразумевается замена одних элементов другими таким образом, чтобы электромагнитные процессы в ней не изменились, а схема упростилась. Одним из видов таких преобразований является замена нескольких потребителей, включённых последовательно или параллельно, одним эквивалентным.

Несколько последовательно соединённых потребителей можно заменить одним, причём его эквивалентное сопротивление равно сумме сопротивлений потребителей, включённых последовательно. Для  $n$  потребителей можно записать:

$$r_{\Sigma} = r_1 + r_2 + \dots + r_n ,$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_n$  – сопротивления каждого из  $n$  потребителей.

При параллельном соединении  $n$  потребителей эквивалентная проводимость  $g_{\Sigma}$  равна сумме проводимостей отдельных элементов, включённых параллельно:

$$g_{\Sigma} = g_1 + g_2 + \dots + g_n.$$

Учитывая, что проводимость является обратной величиной по отношению к сопротивлению, можно эквивалентное сопротивление определить из выражения:

$$1/r_{\Sigma} = 1/r_1 + 1/r_2 + \dots + 1/r_n,$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_n$  – сопротивления каждого из  $n$  потребителей, включённых параллельно.

В частном случае, когда параллельно включены два потребителя  $r_1$  и  $r_2$ , эквивалентное сопротивление цепи:

$$r_{\Sigma} = (r_1 \times r_2) / (r_1 + r_2)$$

Преобразования в сложных цепях, где отсутствует в явном виде последовательное и параллельное соединение элементов (рисунок 1), начинают с замены элементов, включённых в исходной схеме треугольником, на эквивалентные элементы, соединённые звездой.

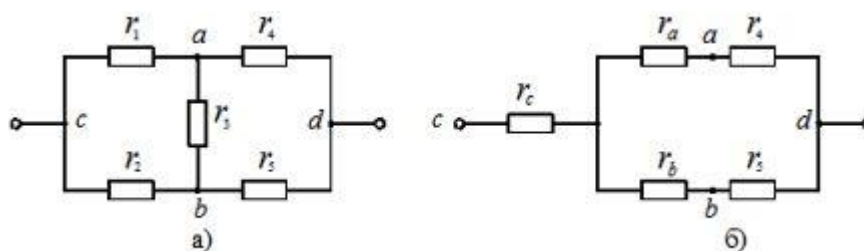


Рисунок 1. Преобразование элементов цепи: а - соединённых треугольником, б - в эквивалентную звезду

На рисунке 1, а треугольник элементов образуют потребители  $r_1, r_2, r_3$ . На рисунке 1, б этот треугольник заменён эквивалентными элементами  $r_a, r_b, r_c$ , соединёнными звездой. Чтобы не происходило изменение потенциалов в точках  $a, b, c$  схемы, сопротивления эквивалентных потребителей определяются из выражений:

$$r_a = \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_2 + r_3} \quad r_b = \frac{r_2 r_3}{r_1 + r_2 + r_3} \quad r_c = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2 + r_3}$$

Упрощение исходной цепи можно также осуществить заменой элементов, соединённых звездой, схемой, в которой потребители соединены треугольником.

В схеме, изображённой на рисунке 2, а, можно выделить звезду, образованную потребителями  $r_1, r_3, r_4$ . Эти элементы включены между

точками c, b, d. На рисунке 2, б между этими точками находятся эквивалентные потребители  $r_{bc}$ ,  $r_{cd}$ ,  $r_{bd}$ , соединённые треугольником. Сопротивления эквивалентных потребителей определяются из выражений:

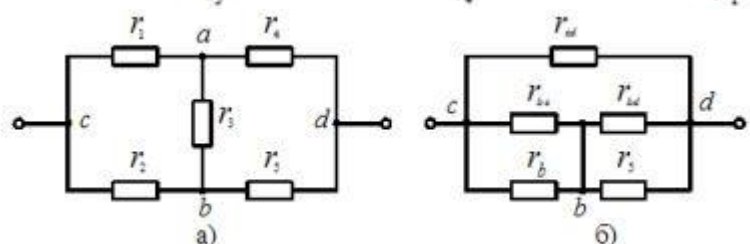
$$r_{cd} = r_1 + r_4 + \frac{r_1 r_4}{r_3}, \quad r_{bc} = r_1 + r_3 + \frac{r_1 r_3}{r_4}, \quad r_{bd} = r_3 + r_4 + \frac{r_3 r_4}{r_1}$$


Рисунок 2. Преобразование элементов цепи: а - соединённых звездой, б - в эквивалентный треугольник

Дальнейшее упрощение схем, приведённых на рисунках 1, б и 2, б, можно осуществлять путём замены участков с последовательным и параллельным соединением элементов их эквивалентными потребителями.

При практической реализации метода расчёта простой цепи с помощью преобразований выявляются в цепи участки с параллельным и последовательным соединением потребителей, а затем рассчитываются эквивалентные сопротивления этих участков.

Если в исходной цепи в явном виде нет таких участков, то, применяя описанные ранее переходы от треугольника элементов к звезде или от звезды к треугольнику, проявляют их.

Данные операции позволяют упростить цепь. Применив их несколько раз, приходят к виду с одним источником и одним эквивалентным потребителем энергии. Далее, применяя законы Ома и Кирхгофа, рассчитывают токи и напряжения на участках цепи.

В ходе расчёта сложной цепи необходимо определить некоторые электрические параметры (в первую очередь токи и напряжения на элементах) на основе исходных величин, заданных в условии задачи. На практике используются несколько методов расчёта таких цепей.

Для определения токов ветвей можно использовать: метод, базирующийся на основании непосредственного применения законов Кирхгофа, метод контурных токов, метод узловых напряжений.

Для проверки правильности вычисления токов необходимо составить баланс мощностей. Из закона сохранения энергии следует, что

алгебраическая сумма мощностей всех источников питания цепи равна арифметической сумме мощностей всех потребителей.

Мощность источника питания равна произведению его ЭДС на величину тока, протекающего через данный источник. Если направление ЭДС и тока в источнике совпадают, то мощность получается положительной. В противном случае она отрицательна.

Мощность потребителя всегда положительна и равна произведению квадрата тока в потребителе на величину его сопротивления.

Математически баланс мощностей можно записать в следующем виде:

$$\sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{k=1}^m I_k^2 r_k$$

где  $n$  – количество источников питания в цепи;  $m$  – количество потребителей.

Если баланс мощностей соблюдается, то расчет токов выполнен правильно.

В процессе составления баланса мощностей можно выяснить, в каком режиме работает источник питания. Если его мощность положительна, то он отдает энергию во внешнюю цепь (например, как аккумулятор в режиме разряда). При отрицательном значении мощности источника последний потребляет энергию из цепи (аккумулятор в режиме заряда).

### 3.3 Резонанс напряжений (5 часов)

Совпадение частоты вынужденных колебаний, сообщаемых физической системе извне, с частотой собственных свободных колебаний называется резонансом.

В ЭЦ переменного тока резонанс возникает при совпадении частот источника и собственных свободных колебаний колебательного контура, т.е. когда в ЭЦ происходит разряд емкости на индуктивность. А это значит, что напряжение на емкости и индуктивности должны быть равны:

$$U_L = U_C, \text{ или } I \cdot X_L = I \cdot X_C.$$

Условием резонанса напряжений можно считать равенство реактивных сопротивлений элементов цепи.

$$X_L = X_C \text{ или } \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Векторная диаграмма резонансной цепи выглядит следующим образом: Вектор напряжения на резисторе совпадает с вектором тока, а векторы напряжений на емкости и индуктивности сдвинуты, относительно вектора тока на  $90^\circ$ , длины их равны. Следовательно, их геометрическая

сумма равна нулю, а напряжение на входных зажимах цепи равна по величине и совпадает по фазе с напряжением на резисторе  $= \dot{U}$ .

Так как мгновенная мощность есть произведение мгновенного напряжения на мгновенный ток, то, очевидно, мгновенные значения мощностей на индуктивности и емкости будут равны по величине и противоположны по знаку.

Энергия электрического поля конденсатора при его разряде переходит в энергию магнитного поля катушки и наоборот. Таким образом, происходят колебания энергии между катушкой и емкостным элементом без участия энергии генератора. Генератор же сообщив первоначальный заряд конденсатору, впоследствии компенсирует только потери энергии в активном сопротивлении.

Полное сопротивление цепи, содержащей резистивный, емкостный и индуктивный элементы, определится по теореме Пифагора. Так как в резонансном режиме реактивные сопротивления равны, то их разность равна нулю. Следовательно, полное сопротивление цепи равно активному сопротивлению резистивного элемента.

Ток в цепи определится выражением:

$$I = \frac{U}{R} \text{ и имеет максимальное значение}$$

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для данной цепи с учетом (2):

$$\dot{U} = \frac{\dot{U}}{R} \cdot R + \frac{\dot{U}}{R} \cdot jX_L - \frac{\dot{U}}{R} \cdot jX_C = \dot{U} + j\dot{U} \frac{X_L}{R} - j\dot{U} \frac{X_C}{R}$$

И в случае, если реактивные сопротивления катушки и емкости много больше, чем активное сопротивление резистора  $X_L = X_C \gg R$ ; то частичные напряжения на катушке и емкости будут больше, чем напряжение на входе цепи  $\dot{U}_L = \dot{U}_C \gg \dot{U}$ . В этом случае, большое частичное напряжение на емкости может привести к пробоем слоя диэлектрика, а на катушке – к пробоем изоляции. По этой причине к технике сильных токов резонанс напряжений считается нежелательным явлением, а в технике слабых токов нашел широкое применение.

Отношение реактивной составляющей напряжения к напряжению, приложенному к цепи, называется добротностью контура, или коэффициентом резонанса. Он показывает, во сколько раз напряжение на катушке или емкости больше, чем напряжение на входе цепи.

$$\frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = Q$$

### **Условия резонанса**

Как настроить цепь в режим резонанса.

1. При известных значениях  $L$  и  $C$ , подобрать резонансную частоту. Используя равенство реактивных сопротивлений, выразим резонансную

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \omega^2 LC = 1 \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

частоту:

2. Для заданного значения частоты изменять значения  $L$  и  $C$ .

Мы уже говорили, что индуктивность катушки увеличивается, если поместить внутрь катушки ферромагнитный сердечник. В автомобильных приемниках настраивают колебательный контур, изменяя индуктивность. Изменять емкость конденсатора можно, увеличивая площадь пластин.

$$L_p = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad C_p = \frac{1}{\omega^2 L}$$

### Частотные характеристики

#### Зависимость полного сопротивления от частоты

Рассмотрим зависимость сопротивлений элементов от частоты. На величину активного сопротивления резистивного элемента частота не влияет, поэтому график представляет собой прямую линию, параллельную оси частоты.

Реактивное индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте, поэтому при увеличении частоты увеличивается и сопротивление. Реактивное емкостное же сопротивление обратно пропорционально частоте, т.е. при частоте, стремящейся к нулю, сопротивление стремится к бесконечности, и, наоборот, при увеличении частоты сопротивление стремится к нулю. Эквивалентное реактивное сопротивление определяется как разность реактивного индуктивного и реактивного емкостного, поэтому, при частоте, меньшей резонансной, эквивалентное будет меньше нуля, а при частоте, больше резонансной – больше нуля. И соответственно при частоте, равной резонансной – эквивалентное будет равно нулю.

Проанализируем, как зависит входное (полное) сопротивление, которое определяется как геометрическая сумма активного и реактивного сопротивлений. При частоте, равной нулю, полное сопротивление равно бесконечности, при резонансной частоте, реактивная составляющая равна нулю, следовательно, полное сопротивление будет равным только активному сопротивлению резистора. И при дальнейшем увеличении частоты, полное сопротивление будет увеличиваться.

#### Фазо-частотная характеристика.

Зависимость фазы (угла сдвига фаз) от частоты:

$$\varphi = (\varphi).$$

Пусть двухполюсник состоит только из элементов, обладающих реактивным сопротивлением, тогда полное сопротивление цепи авно:

$$Z = X$$



В интервале частот от нуля до резонансной, характер нагрузки емкостный, угол сдвига фаз между напряжением и током равен  $-90^\circ$ . После резонансной частоты характер нагрузки индуктивный, а значит, угол сдвига фаз равен  $90^\circ$ . Таким образом, в чисто реактивном двухполюснике фазовый сдвиг меняется от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$ . Если в двухполюсник включить активное сопротивление, то график ФЧХ будет не ступенчатым, а плавно возрастающим, причем, чем больше добротность контура, тем ФЧХ ближе к ступенчатой.

### Амплитудно-частотная характеристика.

Сначала рассмотрим цепь при частоте близкой к нулю. Реактивное емкостное сопротивление стремится к бесконечности, а значит, ток в цепи равен нулю. Реактивное индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте и равно нулю, напряжение на этом элементе тоже будет равным нулю.

При токе, равном нулю, напряжение на активном сопротивлении равно нулю. Из всего вышесказанного следует, что все напряжение источника приложено к емкости.

При резонансной частоте реактивные сопротивления равны, а их сумма равна нулю. Характер нагрузки чисто активный, ток имеет максимальное значение. Напряжения на индуктивности и емкости равны, а их величина зависит от добротности контура. Таким образом, напряжение на активном сопротивлении равно напряжению источника.

При дальнейшем увеличении частоты до бесконечности реактивное индуктивное сопротивление стремится к бесконечности, что соответствует обрыву цепи, ток стремится к нулю. Напряжение на резисторе равно нулю. Напряжения на емкости и индуктивности также стремятся к нулю.

## 3.4 Резонанс токов (5 часов)

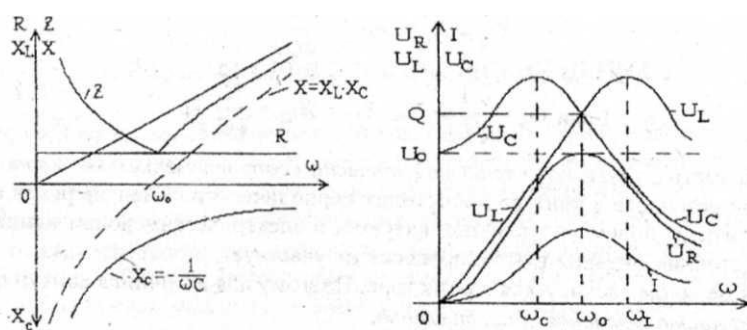
В цепи с параллельным соединением элементов  $R, L, C$  (параллельный колебательный контур, рис. ) возникает *резонанс токов*.

Комплексная входная проводимость цепи

$$\underline{Y}_{BX} = \underline{Y}_R + \underline{Y}_L + \underline{Y}_C = G - j B_L - B_C = G - jB = ye^{-j\varphi}.$$

Условие резонанса – равенство нулю входной реактивной проводимости цепи:

$$\underline{B} = \underline{B}_L - \underline{B}_C = 0; \frac{1}{\omega L} = \omega C; \omega_0 = \frac{1}{LC}$$

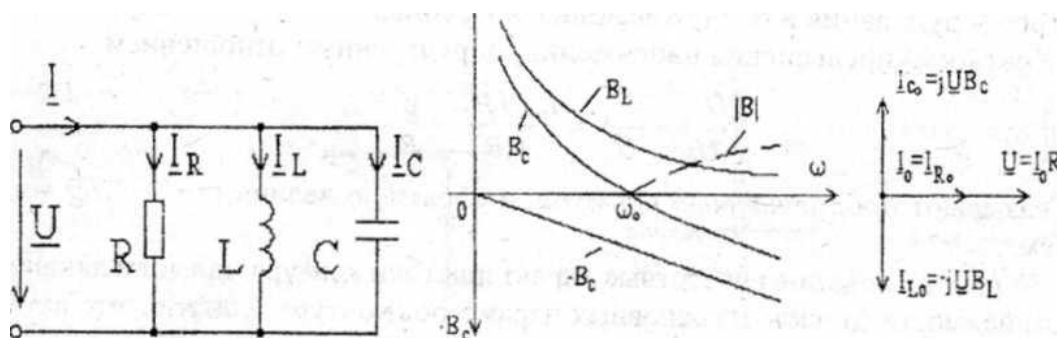


На рис. приведены частотные характеристики идеального контура, для которого  $G = 1/R = Q$ . При угловых частотах  $\omega < \omega_0$  цепь имеет индуктивный характер, а при  $\omega > \omega_0$  – емкостный.

На рис. Показана векторная диаграмма цепи при резонансе. Общий ток  $I_0$  в момент резонанса минимален и определяется напряжением на входе цепи и ее активной проводимостью:

$$I_0 = I_{R0} = \underline{U}G = \underline{U}/R$$

В зависимости от соотношения между  $G$  и  $B$  ( $B_L = B_C$ ), равные между собой при резонансе тока  $I_{L0} = I_{C0}$  могут превышать общий ток  $I_0 = I_{R0}$ ! Кратность превышения тока характеризуется добротностью контура:



$$Q = \frac{I_{L0}}{I_0} = \frac{I_{C0}}{I_0} = \frac{U\omega_0 C}{UG} = \omega_0 \frac{C}{G} = \frac{C}{G} \frac{1}{LC} = \frac{1}{G_0},$$

Где  $G = 1/R$ ;  $\rho = \frac{L}{C}$ .

### 3.5 Уравнение намагничивающих сил трансформатора. Схема замещения трансформатора. (10 часов)

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на :

В режиме холостого хода имеем  $I_2 = 0$ ,  $I_1 = I_0$  – ток холостого хода.

Намагничивающая сила равна  $I_0 w_1$ .

В режиме нагрузки имеем  $I_1 \neq 0$ ,  $I_2 \neq 0$ . Намагничивающая сила трансформатора под нагрузкой равна  $I_1 w_1 + I_2 w_2$ .

Поскольку магнитные потоки в обоих режимах одинаковы, то одинаковы и возбуждающие их намагничивающие силы:

$$\underline{I}_0 w_1 = \underline{I}_1 w_1 + \underline{I}_2 w_2,$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \underline{I}_0 + \underline{I}_2'; \quad \underline{I}_2' = -\frac{\underline{I}_2}{k},$$

где  $\underline{I}_2'$  – приведенный ток вторичной обмотки. Он показывает, какое влияние оказывает ток вторичной обмотки на ток первичной обмотки.

*Основные уравнения работы трансформатора:*

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1; \quad \underline{E}_2 = \underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2; \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}_2'.$$

**Составление схемы замещения.** Систему уравнений, описывающую электромагнитные процессы в трансформаторе, можно свести к одному уравнению, если учесть, что  $E_1 = kE_2$ , и положить

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_0 \underline{Z}_m = \dot{I}_0 (R_m + jX_m).$$

При этом параметры  $R_m$  и  $X_m$  следует выбрать так, чтобы в режиме холостого хода, когда ЭДС  $E_1$  практически равна номинальному напряжению  $U_1$ , ток

$$\dot{I}_0 = \dot{E}_1 / (R_m + jX_m) = \dot{E}_1 / \underline{Z}_m$$

по модулю равнялся бы действующему значению тока холостого хода, а мощностью  $I_0 E_1 \cos \varphi_0 = I_0 R_m$  — мощности, забираемой трансформатором из сети при холостом ходе.

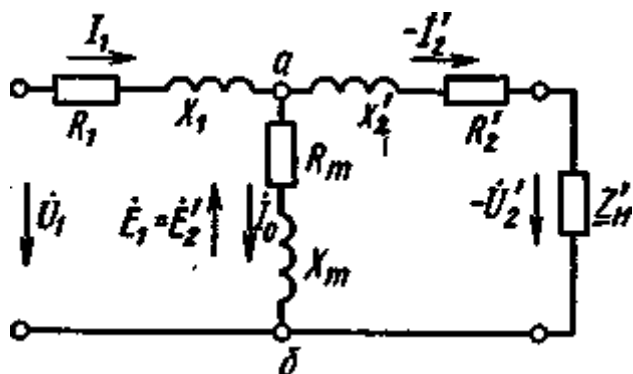
Решим систему уравнений относительно первичного тока

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_1 + [\underline{Z}_m(k^2 \underline{Z}_H + k^2 \underline{Z}_2)] / [\underline{Z}_m + (k^2 \underline{Z}_H + k^2 \underline{Z}_2)]} = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_{\text{ЭКВ}}}.$$

В соответствии с уравнением (2.31) трансформатор можно заменить электрической схемой, по которой можно определить токи  $\dot{I}_1$  и  $\dot{I}_2$ , мощность  $P_1$  забираемую из сети, мощность потерь  $\Delta P$  и т. п. Такую электрическую

схему называют *схемой замещения трансформатора* (рис. 2.28).  
Эквивалентное сопротивление этой схемы

$$\underline{Z}_{\text{ЭКВ}} = \underline{Z}_1 + [\underline{Z}_m (\underline{Z}'_n + \underline{Z}'_2)] / [\underline{Z}_m + (\underline{Z}'_n + \underline{Z}'_2)],$$



2.28. Схема замещения трансформатора

где  $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ ;  $\underline{Z}_m = R_m + jX_m$ ;  $\underline{Z}'_2 = k^2 \underline{Z}_2 = k^2(R_2 + jX_2)$ ;  $\underline{Z}'_n = k^2 \underline{Z}_n$ .

Схема замещения трансформатора представляет собой сочетание двух схем замещения — первичной и вторичной обмоток, которые соединены между собой в точках *a* и *б*. В цепи первичной обмотки включены сопротивления  $R_1$  и  $X_1$ , а в цепи вторичной обмотки — сопротивления  $R'_2$  и  $X'_2$ . Участок схемы замещения между точками *a* и *б*, по которому проходит ток  $I_0$ , называют *намагничивающим контуром*. На вход схемы замещения подают напряжение  $\dot{U}_1$ , к выходу ее подключают переменное сопротивление нагрузки  $\underline{Z}'_n$ , к которому приложено напряжение —  $\dot{U}'_2$ .

Сопротивления  $\underline{Z}'_n$  (и его составляющие  $R'_2 = R_2 k^2$  и  $X'_2 = X_2 k^2$ ), а также  $\underline{Z}'_n$ , называют соответственно *сопротивлениями вторичной обмотки и нагрузки, приведенными к первичной обмотке*. Аналогично приведенными называют значения ЭДС и тока:  $E'_2 = kE_2 = E_1$ ;  $I'_2 = I_2/k$ .

Полная мощность *приведенного контура вторичной обмотки* в схеме замещения равна мощности вторичной обмотки реального трансформатора:  $I'_2 E'_2 = (I_2/k) E_2 k = I_2 E_2$ , а мощность электрических потерь в приведенном вторичном контуре этой схемы равна мощности потерь во вторичной обмотке реального трансформатора:  $I'^2_2 R'_2 = (I_2/k)^2 R_2 k^2 = I_2^2 R_2$ .

Относительные падения напряжений в активном и индуктивном сопротивлениях приведенного вторичного контура также остаются неизменными, как и в реальном трансформаторе:

$$I'^2_2 R'_2 / E'^2_2 = (I_2/k)^2 k^2 R_2 / (kE_2)^2 = I_2^2 R_2 / E_2^2;$$

$$I'^2_2 X'^2_2 / E'^2_2 = (I_2/k)^2 k^2 X_2^2 / (kE_2)^2 = I_2^2 X_2^2 / E_2^2.$$

Физически переход от реального трансформатора к имитирующей его электрической схеме замещения можно наглядно представить состоящим из четырех этапов (рис. 1).

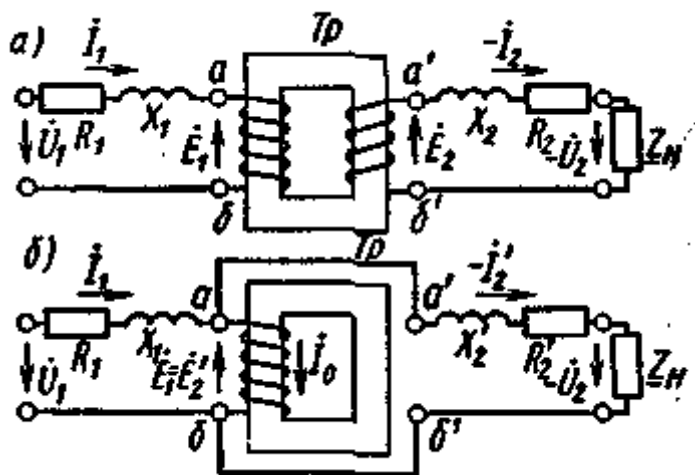


Рис 1. Эквивалентные схемы для приведения вторичной обмотки к первичной

1-й этап. Реальный трансформатор заменяют идеализированным трансформатором  $Tp$ , в цепь первичной обмотки которого включают сопротивления  $R_1$  и  $X_1$  а в цепь вторичной обмотки -  $R_2$  и  $X_2$  (рис. 1,а).

2-й этап. Параметры вторичной обмотки приводят к параметрам первичной, в результате чего ЭДС обмоток оказываются равными:  $E_1 = E_2$ .

3-й этап. Соединяют эквипотенциальные точки  $a$  и  $a'$ ;  $b$  и  $b'$  (рис. 1,б).

4-й этап. Включают дополнительный намагничивающий контур, по которому проходит составляющая  $\dot{I}_0$  первичного тока.

На практике приводят как вторичную обмотку к первичной, так и первичную ко вторичной, в зависимости от того, какие процессы интересуют инженера. Отметим, что параметры схемы замещения можно считать постоянными только при небольших изменениях первичного напряжения, т. е. в пределах  $\pm 10\%$ . Это в первую очередь относится к намагничивающему контуру с сопротивлением  $Z_m = R_m + jX_m$ , параметры которого определяют ток  $\dot{I}_0$ . С увеличением напряжения происходит насыщение стали магнитопровода, вследствие чего уменьшается величина  $X_m$  (намагничивающий ток резко возрастает).

**Определение параметров схемы замещения.** Параметры (Схемы замещения для любого трансформатора можно определить по данным опытов холостого хода и короткого замыкания (рис. 2.30).

Опыт холостого хода. К зажимам одной из обмоток посредством регулятора напряжения ( $PH$ ) (рис. 2.30, а) подводят номинальное напряжение  $U_0 =$

$U_{Iном}$ ; к другой обмотке подключают вольтметр (ее можно считать разомкнутой). Измерив ток холостого хода  $I_0$  и мощность  $P_0$ , потребляемую трансформатором, согласно схеме замещения (рис. 2.31,а) находим

$$\left. \begin{aligned} Z_1 + Z_m &= U_0/I_0; R_1 + R_m = P_0/I_0^2; \\ X_1 + X_m &= \sqrt{(Z_1 + Z_m)^2 - (R_1 + R_m)^2} \end{aligned} \right\}$$

Так как ток холостого хода мал по сравнению с номинальным током трансформатора, электрическими потерями  $\Delta P_{эл1} = I_0^2 R_1$  пренебрегают и считают, что вся мощность, потребляемая трансформатором, расходуется на компенсацию магнитных потерь в стали магнитопровода. При этом

$$P_0 = I_0^2(R_1 + R_m) \approx I_0^2 R_m$$

откуда  $R_m = P_0/I_0^2$ .

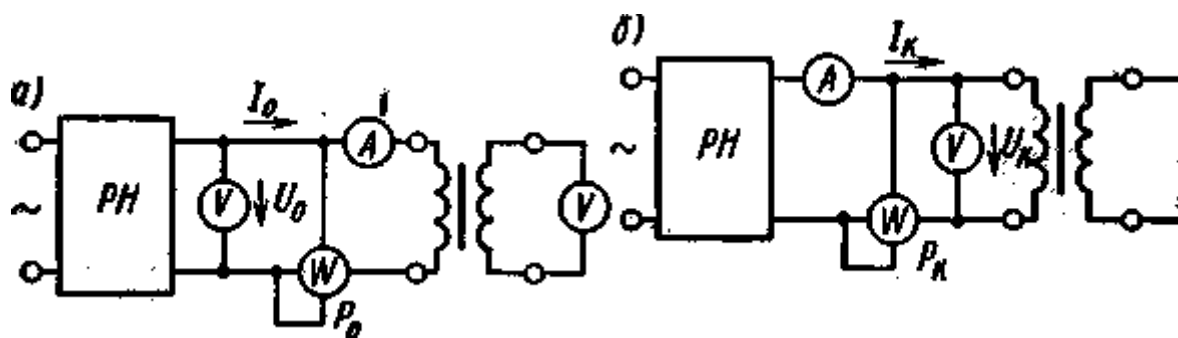


Рис. 2. Схемы проведения опытов холостого хода и короткого замыкания

Аналогично считают, что  $X_1 + X_m \approx X_m$ , так как сопротивление  $X_m$  определяется основным потоком трансформатора  $\Phi$  (потоком взаимоиндукции), а  $X_1$  — потоком рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$ , который во много раз меньше  $\Phi$ . Поэтому с большой степенью точности полагают, что

$$Z_m = U_0/I_0; \quad X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}.$$

Измерив напряжения  $U_0$  и  $U_{20}$  первичной и вторичной обмоток, определяют коэффициент трансформации

$$k = U_0/U_{20}.$$

Векторная диаграмма трансформатора в режиме холостого хода, построенная исходя из указанных выше допущений, изображена на рис. 2.31,б. В действительности ток  $\dot{I}_0$  создает в первичной обмотке падения напряжения  $\dot{I}_0 R_1$  и  $j\dot{I}_0 X_1$  поэтому  $\dot{U}_0 = -\dot{E}_{10} + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_1$ .

Соответствующая векторная диаграмма показана на рис. 2, в.

Опыт короткого замыкания. Вторичную обмотку замыкают накоротко (сопротивление  $Z_H = 0$ ), а к первичной посредством регулятора напряжения РН подводят пониженное напряжение  $U_K$  (см. рис. 2.6) такого значения, при котором по обмоткам проходит номинальный ток  $I_{ном}$ . В мощных силовых трансформаторах напряжение  $U_K$  при коротком замыкании обычно составляет 5 — 15% от номинального. В трансформаторах малой мощности напряжение  $U_K$  может достигать 25-50% от  $U_{ном}$ .

Так как поток, замыкающийся по стальному магнитопроводу, зависит от напряжения, приложенного к первичной обмотке трансформатора, а магнитные потери в стали пропорциональны квадрату индукции, т.е. квадрату магнитного потока, то ввиду малости  $U_K$  пренебрегают магнитными потерями в стали и током холостого хода. При этом из общей схемы замещения трансформатора исключают сопротивления  $R_m$  и  $X_m$  и преобразуют ее в схему, показанную на рис. 2.32, а. Параметры этой схемы определяют из следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} Z_K &= Z_1 + Z'_2 = U_K / I_{ном}; \\ R_K &= R_1 + R'_2 = P_K / I_{ном}^2; \\ X_K &= X_1 + X'_2 + \frac{Z_K^2 - R_K^2}{R_K} \end{aligned} \right\}$$

Разделить  $Z_K$  на составляющие  $Z_1$  и  $Z'_2$  довольно трудно. Обычно принимают схему замещения симметричной, полагая  $Z_1 = Z'_2 = 0,5Z_K$ . Это допущение близко к действительности и не вносит ощутимых погрешностей в расчеты. Векторная диаграмма трансформатора при коротком замыкании показана на рис. 2,б.

Треугольник  $ABC$ , образуемый векторами активного, реактивного и полного падений напряжения, называют *треугольником короткого замыкания или характеристическим треугольником*.

При изменении режима работы трансформатора (тока нагрузки) катеты характеристического треугольника изменяются пропорционально изменению тока. Это позволяет, как показано ниже, очень просто перестраивать векторные диаграммы для упрощенной схемы замещения трансформатора и производить количественные расчеты. Катеты  $BC$  и  $AC$  называют соответственно *реактивной и активной составляющими напряжения короткого замыкания*.

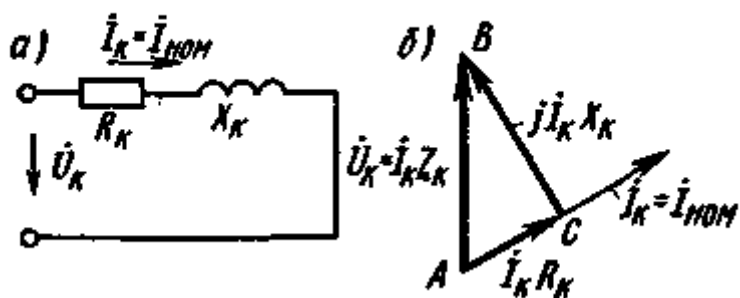


Рис. 3. Схема замещения трансформатора и его векторная диаграмма для режима короткого замыкания

В ГОСТах и паспортах трансформаторов указывают относительное напряжение короткого замыкания при номинальном токе в процентах от номинального напряжения:

$$u_k = \frac{I_{ном} Z_k}{U_{ном}} 100.$$

Аналогично можно выразить относительные значения его активной и реактивной составляющих (в %):

$$u_{k.a} = (I_{ном} R_k / U_{ном}) 100; \quad u_{k.p} = (I_{ном} X_k / U_{ном}) 100.$$

При этом

$$\begin{aligned} u_{k.a} &= u_k \cos \varphi_k; & u_{k.p} &= u_k \sin \varphi_k; \\ u_k &= \sqrt{u_{k.a}^2 + u_{k.p}^2}. \end{aligned}$$

При расчете параметров трансформатора не имеет значения, на какой из обмоток проводится опыт короткого замыкания. Обычно его удобнее проводить, замыкая накоротко обмотку с меньшим числом витков, но вообще следует исходить из удобства подбора приборов и обеспечения условий техники безопасности.

По известному значению  $u_k$  можно определить установившийся ток короткого замыкания в реальных условиях эксплуатации (при номинальном напряжении):

$$I_k = U_{ном} / Z_k = U_{ном} / [u_k U_{ном} / (100 I_{ном})] = 100 I_{ном} / u_k. \quad (2.41)$$

Обычно в силовых трансформаторах большой и средней мощности значение  $u_k$  составляет 5—15%. Поэтому ток короткого замыкания в них в 7—20 раз превышает номинальный. Как правило, чем больше мощность и напряжение



силового трансформатора, тем выше напряжение короткого замыкания  $ик$  (%).

### 3.6 Синхронные генераторы и синхронные двигатели (10 часов)

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие положения:

#### **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-

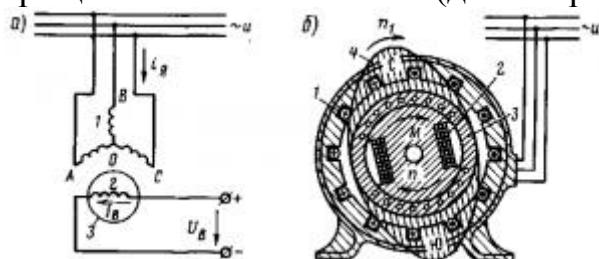


Рис. 1. Электрическая (а) и электромагнитная (б) схемы синхронного электродвигателя

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  $\Phi_B$ ) с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазным током, протекающим по обмотке якоря (поток якоря  $\Phi_B$ ). 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  $M_{вн}$  смещается на некоторый угол  $\theta$  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  $M_{вн}$ . Максимум момента  $M_{max}$  соответствует углу  $\theta = 90^\circ$ , когда оси полюсов ротора расположены между осями «полюсов» статора.

Если нагрузочный момент  $M_{вн}$ , приложенный к валу электродвигателя, станет больше  $M_{max}$ , то двигатель под действием внешнего момента  $M_{вн}$  останавливается; при этом по обмотке якоря неподвижного двигателя будет протекать очень большой ток. Этот режим называется выпадением 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  $M_{вн}$  смещается на угол  $\theta$  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  $M_{вн}$  изменяется лишь угол  $\theta$  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

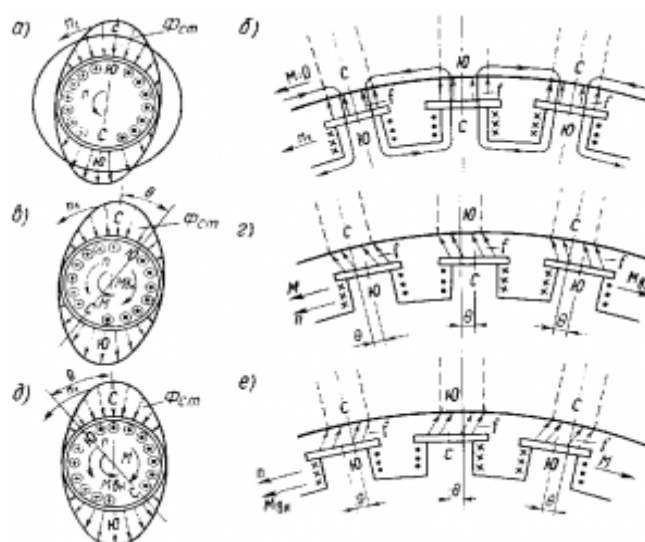


Рис. 2. Электромагнитный момент в синхронной машине, образующийся в различных режимах

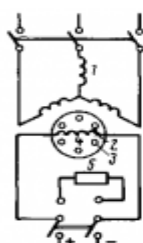


Рис. 293

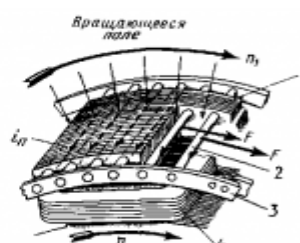


Рис. 294

Рис. 3. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя;

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

### 3.7 Электронные генераторы (5 часов)

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на основные характеристики генератора

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).

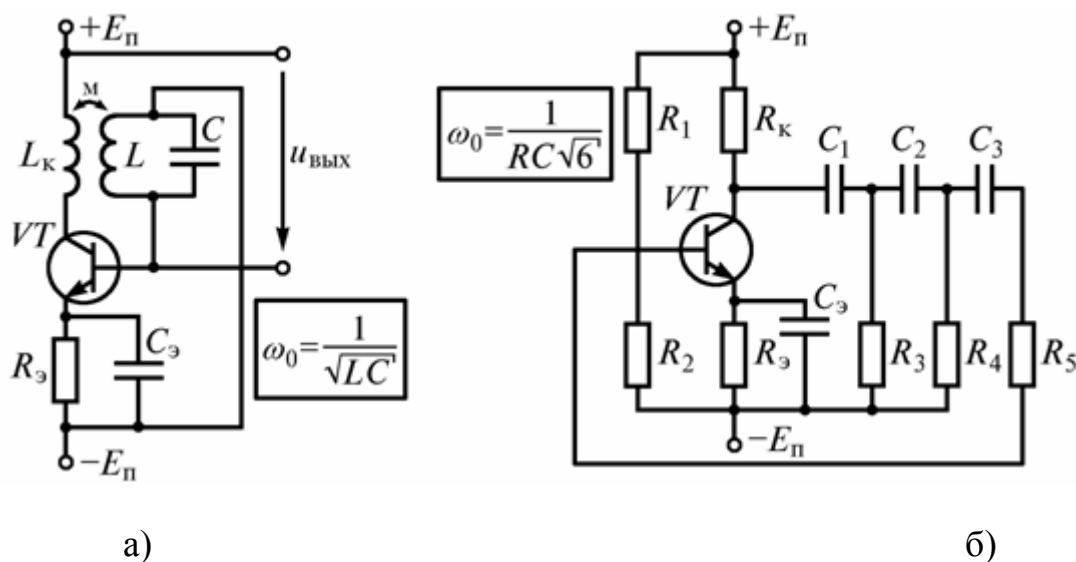


Рис. 2

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  $\omega_0$ . После включения источника питания  $E_{\text{п}}$  в контуре LC возникают колебания и переменный ток базы  $i_{\text{б}}$  усиливается транзистором. Протекающий через катушку ток коллектора  $i_{\text{к}}$  создает на ней падение напряжения, которое в противофазе (вследствие встречного включения катушек  $L_{\text{к}}$  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  $180^\circ$ . Это осуществляют тремя RC-элементами, каждый из которых позволяет получить фазовый сдвиг на  $60^\circ$ . Несмотря на усложнение схемы генератора, она проста в реализации, особенно для низких частот, так как не требует индуктивных катушек, имеющих большие габариты и массу.

### 3.8 Микропроцессоры (5часов)

Микропроцессор (МП) - это программно-управляемое электронное цифровое устройство, предназначенное для обработки цифровой информации и управления процессом этой обработки, выполненное на одной или нескольких интегральных схемах с высокой степенью интеграции электронных элементов.

В 1970 году Маршиан Эдвард Хофф из фирмы Intel сконструировал интегральную схему, аналогичную по своим функциям центральному процессору большой ЭВМ - первый микропроцессор Intel-4004, который уже в 1971 году был выпущен в продажу.

15 ноября 1971 г. можно считать началом новой эры в электронике. В этот день компания приступила к поставкам первого в мире микропроцессора Intel 4004.

Это был настоящий прорыв, ибо МП Intel-4004 размером менее 3 см был производительнее гигантской машины ENIAC. Правда работал он гораздо медленнее и мог обрабатывать одновременно только 4 бита информации (процессоры больших ЭВМ обрабатывали 16 или 32 бита одновременно), но и стоил первый МП в десятки тысяч раз дешевле.

Кристалл представлял собой 4-разрядный процессор с классической архитектурой ЭВМ гарвардского типа и изготавливался по передовой р-канальной МОП технологии с проектными нормами 10 мкм. Электрическая схема прибора насчитывала 2300 транзисторов. МП работал на тактовой частоте 750 кГц при длительности цикла команд 10,8 мкс. Чип i4004 имел адресный стек (счетчик команд и три регистра стека типа LIFO), блок РОНов (регистры сверхоперативной памяти или регистровый файл - РФ), 4-разрядное параллельное АЛУ, аккумулятор, регистр команд с дешифратором команд и схемой управления, а также схему связи с внешними устройствами. Все эти функциональные узлы объединялись между собой 4-разрядной ШД. Память команд достигала 4 Кбайт (для сравнения: объем ЗУ миниЭВМ в начале 70-х годов редко превышал 16 Кбайт), а РФ ЦП насчитывал 16 4-разрядных регистров, которые можно было использовать и как 8 8-разрядных. Такая организация РОНов сохранена и в последующих МП фирмы Intel. Три регистра стека обеспечивали три уровня вложения подпрограмм. МП i4004 монтировался в пластмассовый или металлокерамический корпус типа DIP (Dual In-line Package) всего с 16 выводами. В систему его команд входило всего 46 инструкций.

Вместе с тем кристалл располагал весьма ограниченными средствами ввода/вывода, а в системе команд отсутствовали операции логической обработки данных (И, ИЛИ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ), в связи с чем их приходилось реализовывать с помощью специальных подпрограмм. Модуль i4004 не имел возможности останова (команды HALT) и обработки прерываний.

Цикл команды процессора состоял из 8 тактов задающего генератора. Была мультиплексированная ША (шина адреса)/ШД (шина данных), адрес 12-разрядный передавался по 4-разряда.

1 апреля 1972 г. фирма Intel начала поставки первого в отрасли 8-разрядного прибора i8008. Кристалл изготавливался по р-канальной МОП-технологии с проектными нормами 10 мкм и содержал 3500 транзисторов. Процессор работал на частоте 500 кГц при длительности машинного цикла 20 мкс (10 периодов задающего генератора).

В отличие от своих предшественников МП имел архитектуру ЭВМ принстонского типа, а в качестве памяти допускал применение комбинации ПЗУ и ОЗУ.

По сравнению с i4004 число РОН уменьшилось с 16 до 8, причем два регистра использовались для хранения адреса при косвенной адресации памяти (ограничение технологии - блок РОН аналогично кристаллам 4004 и 4040 в МП 8008 был реализован в виде динамической памяти). Почти вдвое сократилась длительность машинного цикла (с 8 до 5 состояний). Для синхронизации работы с медленными устройствами был введен сигнал готовности READY.

Система команд насчитывала 65 инструкций. МП мог адресовать память объемом 16 Кбайт. Его производительность по сравнению с четырехразрядными МП возрасла в 2,3 раза. В среднем для сопряжения процессора с памятью и устройствами ввода/вывода требовалось около 20 схем средней степени интеграции.

Возможности р-канальной технологии для создания сложных высокопроизводительных МП были почти исчерпаны, поэтому "направление главного удара" перенесли на n-канальную МОП технологию.

1 апреля 1974 МП Intel 8080 был представлен вниманию всех заинтересованных лиц. Благодаря использованию технологии п-МОП с проектными нормами 6 мкм, на кристалле удалось разместить 6 тыс. транзисторов. Тактовая частота процессора была доведена до 2 МГц, а длительность цикла команд составила уже 2 мкс. Объем памяти, адресуемой процессором, был увеличен до 64 Кбайт.

За счет использования 40-выводного корпуса удалось разделить ША и ШД, общее число микросхем, требовавшихся для построения системы в минимальной конфигурации сократилось до 6

В РФ были введены указатель стека, активно используемый при обработке прерываний, а также два программнонедоступных регистра для внутренних пересылок. Блок РОНов был реализован на микросхемах статической памяти. Исключение аккумулятора из РФ и введение его в состав АЛУ упростило схему управления внутренней шиной.

Новое в архитектуре МП - использование многоуровневой системы прерываний по вектору. Такое техническое решение позволило довести общее число источников прерываний до 256 (до появления БИС контроллеров прерываний схема формирования векторов прерываний требовала применения до 10 дополнительных чипов средней интеграции). В i8080 появился механизм прямого доступа в память (ПДП) (как ранее в универсальных ЭВМ IBM System 360 и др.).

ПДП открыл зеленую улицу для применения в микроЭВМ таких сложных устройств, как накопители на магнитных дисках и лентах дисплеи на ЭЛТ, которые и превратили микроЭВМ в полноценную вычислительную систему.

Традицией компании, начиная с первого кристалла, стал выпуск не отдельного чипа ЦП, а семейства БИС, рассчитанных на совместное использование.

### **Достоинства микропроцессоров.**

Микропроцессор, иначе, центральный процессор - Central Processing Unit (CPU) - функционально законченное программно-управляемое устройство обработки информации, выполненное в виде одной или нескольких больших (БИС) или сверхбольших (СБИС) интегральных схем.

Для МП на БИС или СБИС характерны:

- простота производства (по единой технологии);
- низкая стоимость (при массовом производстве);
- малые габариты (пластина площадью несколько квадратных сантиметров или кубик со стороной несколько миллиметров);
- высокая надежность;
- малое потребление энергии.

Микропроцессор выполняет следующие функции:

- чтение и дешифрацию команд из основной памяти;
- чтение данных из ОП и регистров адаптеров внешних устройств;
- прием и обработку запросов и команд от адаптеров на обслуживание ВУ;



- обработку данных и их запись в ОП и регистры адаптеров ВУ;
- выработку управляющих сигналов для всех прочих узлов и блоков ПК.

### **Принцип работы микропроцессора.**

В состав МП входят арифметическо-логическое устройство, устройство управления и блок внутренних регистров.

*Арифметическо-логическое устройство* состоит из двоичного сумматора со схемами ускоренного переноса, сдвигающего регистры и регистров для временного хранения операндов. Обычно это устройство выполняет по командам несколько простейших операций: сложение, вычитание, сдвиг, пересылку, логическое сложение (ИЛИ), логическое умножение (И), сложение по модулю 2.

*Устройство управления* управляет работой АЛУ и внутренних регистров в процессе выполнения команды. Согласно коду операций, содержащемуся в команде, оно формирует внутренние сигналы управления блоками МП. Адресная часть команды совместно с сигналами управления используется для считывания данных из определенной ячейке памяти или для записи данных в ячейку. По сигналам УУ осуществляется выборка каждой новой, очередной команды.

*Блок внутренних регистров* БВР, расширяющий возможности АЛУ, служит внутренней памятью МП и используется для временного хранения данных и команд. Он также выполняет некоторые процедуры обработки информации.

На рисунке (2) приведена более подробная структурная схема однокристалльного МП. Здесь блок внутренних регистров содержит регистры общего назначения и специальные регистры: регистр-аккумулятор, буферный регистр адреса, буферный регистр данных, счетчик команд, стека, признаков.

*Регистры общего назначения* (РОН), число которых может изменяться от 4 до 64, определяют вычислительные возможности МП. Их функция – хранение операндов. Но могут выполнять также и роль регистров. Все РОН доступны программисту, который рассматривает их как сверхоперативное запоминающее устройство.

*Регистр – аккумулятор («накопитель»)*, предназначен для временного хранения операнда или промежуточного результата действий производимой в АЛУ. Разрядность регистра равна разрядности информационного слова.

*Буферный регистр адреса* служит для приема и хранения адресной части выполняемой команды. Возможное количество адресов, определяется разрядностью регистра.

*Буферный регистр данных* используется для временного хранения выбранного из памяти слова перед передачей его во внешнюю шину данных. Его разрядность определяется количеством байт информационного слова.

*Счетчик команд* содержит адрес ячейки памяти, в которой помещены байты выполняемой команды.

*Регистр команд* принимает и хранит код очередной команды, адрес которой находится в счетчике команд. По сигналу УУ в него передается из регистра хранимая там информация.

*Регистры стека* делятся на стек и указатель стека. В МП стек – набор регистров, хранящих адреса команд возврата при обращении к подпрограммам или состояние внутренних регистров при обработке прерываний. Стек может быть выполнен не только на внутренних регистрах МП, составляя его часть, но и находиться в ОЗУ, занимая там отведенную для него зону. В последнем случае для обращения к нему необходим специальный регистр – указатель стека.

*Указатель стека* хранит адреса последней занятой ячейки стека, которую называют вершиной. Содержащее в указателе число указывает, где находится вершина стека. Когда в стек записывается очередное слово, то число в указателе стека соответственно увеличивается. Извлечение слова из стека сопровождается, наоборот, уменьшением числа, заполняющего указатель стека. Кроме такой процедуры предусматривается возможность считывания без разрушений содержимого любой ячейки стека при неизменном числе, хранимом в указателе стека.

*Регистр признаков* представляет собой набор триггеров – флажков. В зависимости от результатов операций, выполняемых АЛУ, каждый триггер устанавливается в состояние 0 или 1. Флажковые биты, определяющие содержимое регистра, индицируют условные признаки: нулевого результата, знака результата, перевыполнения и т. п. Эта информация, характеризующая состояние процессора, важна для выбора дальнейшего пути вычислений.

*Внутренняя шина данных* соединяет собой основные части МП.

*Шиной* называют группу линий передачи информации, объединенных общим функциональным признаком. В микропроцессорной схеме используется три вида шин: данных, адресов и управления.

Разрядность внутренней шины данных т. е. количество передаваемых по ней одновременно (параллельно) битов числа соответствует разрядности слов, которыми оперирует МП. Очевидно, что разрядность внутренней и внешней шин данных должна быть одной и той же. У восьмиразрядного МП внутренняя шина данных состоит из восьми линий, по которым можно передавать последовательно восьмиразрядные слова – байты. Следует иметь в виду, что по шине данных передаются не только обрабатываемые АЛУ слова, но и командная информация. Следовательно, недостаточно высокая разрядность шины данных может ограничить состав (сложность) команд и их число. Поэтому разрядность шины данных относят к важным характеристикам микропроцессора – она в большей мере определяет его структуру (числа разрядов указаны на рисунке в скобках рядом с названиями блоков).

Шина данных МП работает в режиме двунаправленной передачи, т. е. по ней можно передавать слова в обоих направлениях, но не одновременно. В этом случае требуется применение специальных буферных схем и мультиплексного режима обмена данных между МП и внешней памятью. *Мультиплексный режим* (от английского слова multiple – многократный, множественный), иногда называемый *многоточечным*, - режим одновременного использования канала передачи большим числом абонентов с разделением во времени средств управления обменом.

*Мультиплексор* – устройство, которое выбирает данные от одного, двух (или более) входных информационных каналов и подает эти данные на свой выход. Схема мультиплексора состоит из двухвходовых логических элементов И – ИЛИ, управляемых распределителем импульсов. Промышленностью выпускаются мультиплексоры, которые могут входить в состав , а также в виде отдельных БИС (например, восьмивходовый одноразрядный; двухвходовый четырехразрядный; трехвходовый четырехразрядный и др.).

*Демультимплексор* – устройство, выполняющее противоположную мультиплексору функцию, - подает данные, подводимые к его входу, на один (или более) выходной информационный канал.

Мультиплексоры и демультимплексоры позволяют компоновать из микропроцессорных элементов микроЭВМ для любой длины машинного слова. Предположим, что задача обработки данных заключается в сложении двух операндов, каждый из которых представляет собой восьмиразрядное двоичное число – байт.

*Восьмиразрядное арифметически – логическое устройство* выполняет все арифметические и логические операции. На первый вход АЛУ поступает байт из восьмиразрядного *аккумулятора*, а на второй вход – из восьмиразрядного *промежуточного регистра*. Результат сложения указанных двух байтов передается с выхода АЛУ через внутреннюю шину данных в аккумулятор. Такая организация удовлетворяет одноадресной организации микропроцессора. Для нее характерно то, что один из операндов, участвующих в обработке, всегда находится в аккумуляторе, адрес которого задан неявно. Поэтому при выполнении операции сложения двух операндов требуется указывать только один адрес – второго операнда, содержащегося, например в одном из восьми *регистров общего назначения* (РОН). К АЛУ подключены *регистр признаков*, предназначенный для хранения и анализа признаков результата операции, и *схема десятичной коррекции* (на рис. 2 не показана), позволяющая проводить обработку данных в двоично-десятичном коде.

В состав микропроцессора входят также указатель стек, счетчик команд, буферный регистр адреса, ОЗУ. Первые два РОН – регистры W и Z – предназначены для кратковременного хранения данных во время выполнения команды (эти регистры недоступны программисту), остальные шесть РОН – регистры B, C, D, E, H и L – служат ячейками внутренней памяти, называемой *сверхоперативным запоминающим устройством* (СОЗУ). В них хранятся операнды, подлежащие обработке в АЛУ, результаты обработки данных, выполненных в АЛУ, и управляющие слова. В каждом регистре помещается один байт. Обращение к РОН – адресное. Попарное расположение регистров B и C, D и E, H и L дает возможность проводить обработку двухбайтовых слов, называемую обработкой “удвоенной точности”. Обмен данными с РОН (считывание и запись информации) осуществляется через *мультиплексор*, причем требуемый регистр выбирается с помощью *селектора регистров по сигналу УУ*.

В левой части расположены регистр команд, дешифратор кода операции и УУ (хотя дешифратор относится к УУ, он нарисован отдельно для большей наглядности). Стековый регистр адреса на рисунке отсутствует, так как стек представляет собой определенную зону ОЗУ.

Обмен информацией между регистрами и другими блоками микропроцессора производится через внутреннюю шину данных, причем передачи команд и данных разделены во времени. Связь с внешней шиной данных осуществляется через *буферный регистр данных*.

Микропроцессор – это программно-управляемое устройство. Процедура выполняемой им обработки данных определяется программой, т. е. совокупностью команд. Команда делится на две части: код операции и адрес. В коде операции заключена информация о том, какая операция должна

быть выполнена над данными, подлежащими обработке. Адрес указывает место, где расположены эти данные (в регистрах общего назначения микропроцессора, т. е. во внутренней или внешней памяти). Слово данных, подвергаемое обработке, представляет один байт. Команда может состоять из одного, двух или трех байтов, последовательно расположенных в памяти.

Первый байт команды содержит код операции. Считанный в начале интервала выполнения команды, называемого циклом команды, ее первый байт поступает по внутренней шине данных в регистр команд, где хранится в течение всего цикла. Дешифратор кода операции дешифрует содержимое регистра команд – определяет характер операции и адреса операндов. Эта информация подается в УУ, которое вырабатывает управляющие сигналы, направляемые в блоки микропроцессора, участвующие в выполнении данной команды.

В том случае, когда код операции непосредственно указывает адрес данных – объекта обработки, операция начинается сразу после считывания первого байта команды. Если же в команде содержится более одного байта, то остальные байты, несущие информацию об адресе ячейки памяти, где хранятся данные, передаются либо в буферный регистр адреса, либо в один из РОН только после завершения всей процедуры считывания команды или, иначе говоря, после получения полной информации о местонахождении операндов и о том, какая операция должна выполняться, начинается операция.

Рассмотрим пример выполнения операции сложения двух операндов. Первый операнд хранится в аккумуляторе, второй в одном из РОН (его адрес указан в команде), откуда он передается в промежуточный регистр. Согласно коду операции АЛУ суммирует поступающие на его вход байты и выдает результат, который фиксируется в аккумуляторе. Этот результат можно использовать при дальнейших этапах обработки.

Наряду с многокристальными и однокристальными МП используются секционированные или разрядно-модульные МП. Основной их отличительной особенностью является то, что каждый модуль предназначен для обработки нескольких разрядов машинного слова, а слово в целом обрабатывается группой модулей или секций, соединенных между собой.

**Архитектура микропроцессора (Architecture)** – принцип его внутренней организации, общая структура, конкретная логическая структура отдельных устройств.

Понятие архитектуры микропроцессора включает в себя систему команд и способы адресации, возможность совмещения выполнения команд во времени, наличие дополнительных устройств в составе микропроцессора,

принципы и режимы его работы. Выделяют понятия микроархитектуры и макроархитектуры.

*Микроархитектура микропроцессора* - это аппаратная организация и логическая структура микропроцессора, регистры, управляющие схемы, арифметико-логические устройства, запоминающие устройства и связывающие их информационные магистрали.

*Макроархитектура микропроцессора* - это система команд, типы обрабатываемых данных, режимы адресации и принципы работы микропроцессора.

В общем случае под архитектурой ЭВМ понимается абстрактное представление машины в терминах основных функциональных модулей, языка ЭВМ, структуры данных.

#### 1. В соответствии с архитектурными особенностями, определяющими свойства системы команд, различают:

- Микропроцессоры с **CISC** архитектурой.

CISC (Complex Instruction Set Computer) - Компьютер со сложной системой команд. Исторически они первые и включают большое количество команд. Все микропроцессоры корпораций Intel (Integrated Electronics) и AMD (Advanced Micro Devices) относятся к категории CISC.

- Микропроцессоры с **RISC** архитектурой.

RISC (Reduced Instruction Set Computer) - Компьютер с сокращенной системой команд. Упрощена система команд и сокращена до такой степени, что каждая инструкция выполняется за единственный такт. Вследствие этого упростилась структура микропроцессора, и увеличилось его быстродействие.

Пример микропроцессора с RISC-архитектурой - Power PC. Микропроцессор Power PC начал разрабатываться в 1981 году тремя фирмами: IBM, Motorola, Apple.

- Микропроцессоры с **MISC** архитектурой.

MISC (Minimum Instruction Set Computer) - Компьютер с минимальной системой команд. Последовательность простых инструкций объединяется в пакет, таким образом, программа преобразуется в небольшое количество длинных команд.

2. Разрядность – максимальное количество разрядов двоичного кода, которые могут обрабатываться или передаваться одновременно.

Современные микропроцессоры построены на 32-х битной архитектуре **x86** или **IA-32** (Intel Architecture 32 bit), но совсем скоро произойдет переход на более совершенную, производительную 64-х битную архитектуру **IA-64** (Intel Architecture 64 bit). Фактически переход уже начался, этому свидетельствует массовый выпуск и выход в продажу в 2003 году нового микропроцессора Athlon 64 корпорации AMD (Advanced Micro Devices), этот микропроцессор примечателен тем, что может работать как с 32-х битными приложениями, так и с 64-х битными. Производительность 64-х битных микропроцессоров намного выше.

Разрядность микропроцессора обозначается m/n/k/ и включает:

m - разрядность внутренних регистров, определяет принадлежность к тому или иному классу процессоров;

n - разрядность шины данных, определяет скорость передачи информации;

k - разрядность шины адреса, определяет размер адресного пространства. (Например, микропроцессор i8088 характеризуется значениями m/n/k=16/8/20)

3. Объем адресуемой памяти – максимальный объем памяти, который может обслужить микропроцессор.

32-х разрядный микропроцессор может обслужить 64 Гб ( $4 \times 10^9$  байт) памяти, а 64-х разрядный микропроцессор может обслужить 64 Тб ( $64 \times 10^{12}$  байт) памяти.

4. Набор дополнительных инструкций (Instruction Set) - применяются в современных CISC-микропроцессорах и способны значительно ускорить их работу. Естественно только при условии поддержки данных наборов со стороны приложения. Все традиционные современные процессоры поддерживают набор инструкций MMX, который был самым первым (разработан корпорацией Intel еще в 1997 году). MMX расшифровывается как MultiMedia eXtensions (мультимедийные расширения). Он представил дополнительные возможности, ориентированные на обработку цифрового изображения и звука. В основе технологии лежит концепция (микроархитектура) SIMD (Single Instruction Many Data – "одна команда,

много данных"), когда при помощи одной инструкции одновременно обрабатывается несколько элементов данных. SSE, SSE2, 3DNow! - дальнейшее развитие этой идеи. Микропроцессоры Intel Pentium 3 поддерживают SSE, а Pentium 4 и AMD Athlon 64 еще и SSE2 (это относится и к соответствующим микропроцессорам Intel Celeron). Процессоры AMD Athlon и Duron поддерживают наборы инструкций 3DNow!Professional и MMX, в Athlon XP была добавлена поддержка SSE (на уровне микрокода ядра).

#### **4. Методические рекомендации по подготовке к занятиям**

**4.1** Лабораторная работа 1,2 (ЛР – 1,2) Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов и методом наложения. Исследование сложной цепи постоянного тока с использованием законов Кирхгофа и метода контурных токов.

##### **Вопросы к занятию**

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

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

**4.2** Лабораторная работа 3 (ЛР – 3) 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 Лабораторная работа 4 (ЛР-4) Усилитель постоянного тока**

##### **Вопросы к занятию**

1. Изучить принцип действия транзистора.
2. Изучить схемы усилителя постоянного тока

#### **4.4 Лабораторная работа 5 (ЛР-5) Двухполупериодный неуправляемый выпрямитель**

##### **Вопросы к занятию**

1. Изучить принцип действия диода.
2. Изучить схемы двухполупериодных выпрямителей и принцип действия сглаживающих фильтров.
3. Исследовать работу сглаживающего фильтра при двухполупериодном выпрямлении.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на схемах одно- и двухполупериодных выпрямителей.

#### **4.5 Практическое занятие 1 (ПЗ-1). 2 часа Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов и методом наложения.**

1. Методом контурных токов определить токи в ветвях схемы

##### **Краткое описание проводимого занятия:**

Определяем количество уравнений системы:

$$K=B-(Y-1)=8-(5-1)=4$$

Выбираем контуры и записываем для каждого уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$1-4-3-2 \quad I_{11} \cdot (R_3 + R_4 + R_5 + R_6) - I_{22} \cdot R_4 - I_{33} \cdot R_5 - I_{44} \cdot R_6 = 0$$

$$1-2-5-2 \quad -I_{11} \cdot R_4 + I_{22} \cdot (R_1 + R_4 + R_7) - I_{33} \cdot R_7 - I_{44} \cdot 0 = E_1$$

$$2-3-5-2 \quad -I_{11} \cdot R_5 - I_{22} \cdot R_7 + I_{33} \cdot (R_5 + R_7 + R_8) - I_{44} \cdot R_8 = 0$$

$$3-4-5-3 \quad -I_{11} \cdot R_6 - I_{22} \cdot 0 - I_{33} \cdot R_8 + I_{44} \cdot (R_2 + R_6 + R_8) = -E_2$$

Решив систему одним из численных методов, получим значения контурных токов:

$$I_{11}=10 \text{ A}; \quad I_{22}=15 \text{ A}; \quad I_{33}=5 \text{ A}; \quad I_{44}= -15 \text{ A}.$$

Затем выражаем токи ветвей из контурных токов.

$$I_1 = I_{22} = 15 \text{ A}; \quad I_3 = I_{11} = 10 \text{ A}; \quad I_5 = I_{11} - I_{33} = 5 \text{ A};$$

$$I_7 = I_{22} - I_{33} = 10 \text{ A}; \quad I_2 = -I_{44} = 15 \text{ A}; \quad I_4 = I_{22} - I_{11} = 5 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{11} - I_{44} = 25 \text{ A}; \quad I_8 = I_{33} - I_{44} = 20 \text{ A};$$

Составляем баланс мощностей:

$$P_{\text{ист}} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 = 145 \cdot 15 + 140 \cdot 15 = 4275 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{потр}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6 + I_7^2 R_7 + I_8^2 R_8$$

$$I_8^2 R_8 = 4275 \text{ Вт}$$