

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

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

Б1.В.06 Электротехника и электроника

Направление подготовки 35.03.06 Агроинженерия

Профиль образовательной программы Технический сервис в АПК

Форма обучения очная

СОДЕРЖАНИЕ

1. Организация самостоятельной работы	4
2. Методические рекомендации по выполнению индивидуальных домашних заданий.....	5
3. Методические рекомендации по самостоятельному изучению вопросов.....	13
3.1 Расчет магнитных цепей	13
3.2 Применение законов Кирхгофа при расчете сложных цепей.....	16
3.3 Метод эквивалентных преобразований	16
3.4 Компенсация реактивной мощности.....	17
3.5 Методика расчета цепи трехфазного переменного тока при соединении нагрузки звездой без нейтрального провода.	20
3.6 Уравнение намагничивающих сил трансформатора. Схема замещения трансформатора.....	26
3.7 Синхронные генераторы и синхронные двигатели.....	28
3.8 Электронные генераторы.....	31
3.9 Электронные ключи. Электронные реле	35
4. Методические рекомендации по подготовке к занятиям	40
4.1 Лабораторное занятие №1 «Электробезопасность. Техника безопасности при эксплуатации электроустановок».....	40
4.2 Лабораторное занятие №2 «Электрические измерения и приборы	40
4.3 Лабораторное занятие №3 «Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока».....	40
4.4 Лабораторное занятие №4 «Исследование цепи постоянного тока с последовательным и параллельным включением элементов».....	41
4.5 Лабораторное занятие №5 «Исследование сложной цепи постоянного тока со смешанным соединением элементов».....	41
4.6 Лабораторное занятие №6 «Исследование простых цепей синусоидального переменного тока»	41
4.7 Лабораторное занятие №7 «Исследование резонансных явлений в цепи переменного тока. Резонанс напряжения».....	42

4.8 Лабораторное занятие №8 «Исследование резонансных явлений в цепи переменного тока. Резонанс тока»	42
4.9 Лабораторное занятие №9 «Исследование цепи переменного тока» ..	42
4.10 Лабораторное занятие №10 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока с однофазным приемником»	43
4.11 Лабораторное занятие №11 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при включении нагрузки звездой»	43
4.12 Лабораторное занятие №12 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при включении нагрузки треугольником»	43
4.13 Лабораторное занятие №13 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока с трехфазным приемником»	44
4.14 Лабораторное занятие №14 «Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему»	44
4.15 Лабораторное занятие №15 «Исследование и расчет параметров схемы замещения воздушного трансформатора»	44
4.16 Лабораторное занятие №16 «Исследование и расчет параметров схемы замещения воздушного трансформатора»	46
4.17 Лабораторное занятие №17 «Неуправляемые двухполупериодные выпрямители»	46
4.18 Лабораторное занятие №18 «Усилитель постоянного тока»	46

1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1.1. Организационно-методические данные дисциплины

№ п. п.	Наименование темы	Общий объем часов по видам самостоятельной работы				
		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	Тема 1 Расчет простых цепей при последовательном, параллельном и смешанном включении элементов. Законы Кирхгофа..		х	3	3	0,8
2	Тема 2 Методы расчета сложных электрических цепей постоянного тока.		х		3	0,8
3	Тема 3 Электромагнетизм.				2	1
4	Тема 4 Цепи однофазного переменного тока		х	4	9	0,8
5	Тема 5 Цепи трехфазного переменного тока		х	3	9	0,8
6	Тема 6 Трансформаторы.		х		2	0,8
7	Тема 7 Асинхронные машины переменного тока. Синхронные машины. Машины постоянного тока		х		4	0,8
8	Тема 8 Основы электропривода.					0,8
9	Тема 9 Полупроводниковые приборы.		х		4	0,8
0	Тема 10 Микропроцессоры.		х			0,8
11	Тема 11 Электроизмерения					0,8

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОМАШНИХ ЗАДАНИЙ

Индивидуальные домашние задания выполняются в форме расчетно-графической работы.

2.1 Темы индивидуальных домашних заданий

Расчет цепей постоянного тока. Расчет цепей однофазного переменного тока. Расчет цепей трехфазного тока

2.2 Содержание индивидуальных домашних заданий

Приводится перечень заданий (вопросов), выполняемых в индивидуальном домашнем задании.

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

2.3 Порядок выполнения заданий

Необходимо указать:

номер варианта задания

принципиальную электрическую схему

исходные данные варианта для расчета

результаты расчетов

Каждый этап решения должен иметь пояснение. Конечный результат должен быть выделен из общего текста

2.4 Пример выполнения задания

2.4.1 Пример расчета цепей постоянного тока

Задача 1. Методом контурных токов определить токи в ветвях схемы (рисунок 1) если $E_1 = 145 \text{ В}$, $E_2 = 140 \text{ В}$, $R_1 = R_2 = R_6 = 1 \text{ Ом}$, $R_3 = 0.5 \text{ Ом}$, $R_4 = 10 \text{ Ом}$, $R_5 = 4 \text{ Ом}$, $R_7 = 8 \text{ Ом}$, $R_8 = 5 \text{ Ом}$.

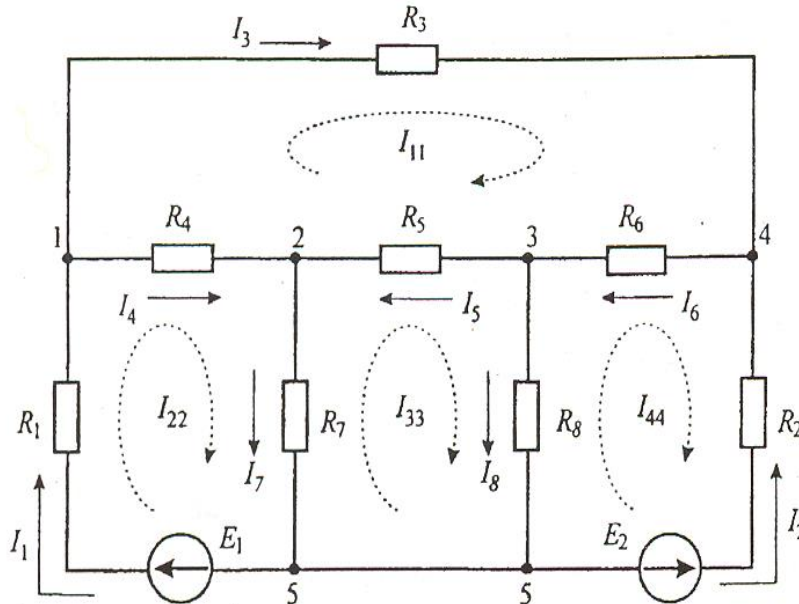


Рисунок 1

Решение:

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:

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

Затем выражаем токи ветвей из контурных токов.

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

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

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

Составляем баланс мощностей:

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

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

$$I_8^2 R_8 = 4275 \text{ Вт}$$

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

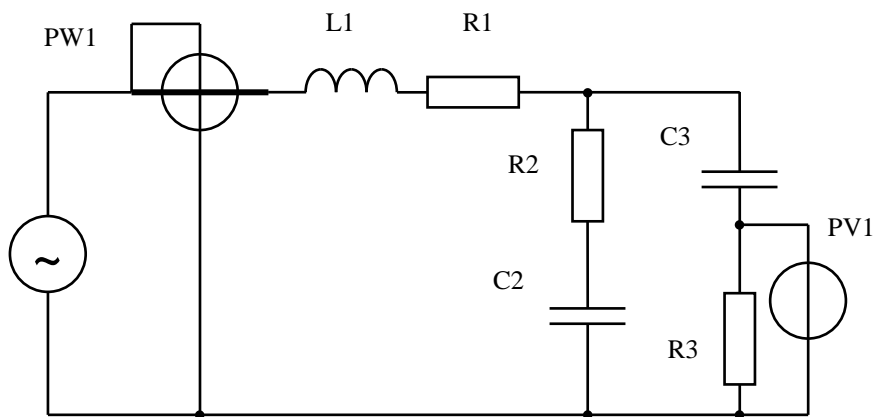


Рис. 2

На рисунке 2 изображена схема электрической цепи, параметры которой следующие:

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

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

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

Решение:

Определяем круговую частоту переменного тока

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

Рассчитываем сопротивления реактивных элементов цепи

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

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

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

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. 3 .

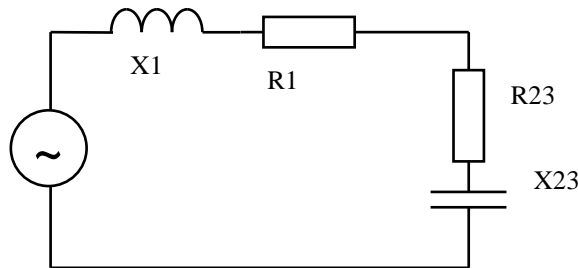


Рис. 3

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

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

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

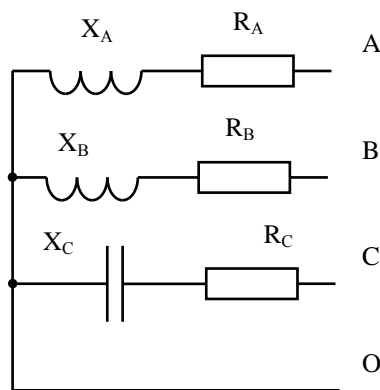


Рис 4

На рисунке 4 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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_A} = \frac{73e^{j0^\circ}}{28,7e^{j60,8^\circ}} = 2,56e^{-j61^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_B} = \frac{73e^{-j120^\circ}}{31,3e^{j26,6^\circ}} = 2,34e^{-j147^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_C} = \frac{73e^{j120^\circ}}{28,2e^{-j22,9^\circ}} = 2,6e^{j143^\circ} \text{ А}.$$

Используя первый закон Кирхгофа, определяем ток нейтрального провода

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

Определяем мощности отдельных фаз

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

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

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

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

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

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

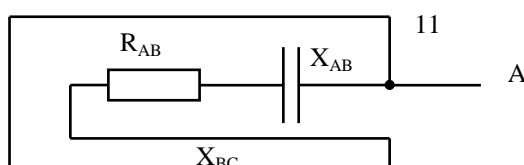


Рис 5

На рисунке 5 изображена схема электрической цепи, параметры которой следующие:

$$U_{\text{л}} = 380 \text{ В}, R_{\text{AB}} = 80 \text{ Ом}, R_{\text{CA}} = 30 \text{ Ом}, \\ X_{\text{AB}} = 50 \text{ Ом}, X_{\text{BC}} = 60 \text{ Ом}, X_{\text{CA}} = 70 \text{ Ом}.$$

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

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

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

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

Используя закон Ома для участка цепи, находим фазные токи

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

Используя первый закон Кирхгофа, определяем линейные токи

$$\begin{aligned} i_A &= i_{AB} - i_{CA} = 4e^{j32^\circ} - 5e^{j187^\circ} = (3,4 + j2,1) - (-4,9 - j0,6) = \\ &= 8,3 + j2,7 = 8,8e^{j18^\circ} \text{ A} \\ i_B &= i_{BC} - i_{AB} = 6,3e^{-j210^\circ} - 4e^{j32^\circ} = (-5,5 + j3,2) - (3,4 + j2,1) = \\ &= -8,9 + j1,1 = 9e^{j173^\circ} \text{ A} \\ i_C &= i_{CA} - i_{BC} = 5e^{j187^\circ} - 6,3e^{-j210^\circ} = (-4,9 - j0,6) - (-5,5 + j3,2) = \\ &= 0,6 - j3,8 = 3,85e^{-j81^\circ} \text{ A} \end{aligned}$$

Определяем мощности отдельных фаз

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

Рассчитываем мощность всей цепи

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

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

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

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

3.1 Расчет магнитных цепей

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на законы, применяемые при расчете магнитных цепей.

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

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

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

Для однородной магнитной цепи прямая задача решается в следующей последовательности:

а) по заданному магнитному потоку и габаритам цепи определяют магнитную индукцию;

б) по кривой намагничивания материала сердечника определяют напряженность H по вычисленной индукции B ;

в) по закону полного тока определяют намагничивающую силу $IW = Hl$,

где S — сечение магнитопровода; l — длина средней линии магнитопровода.

Обратная задача для однородной цепи решается в обратной последовательности, т. е.:

а) по закону полного тока определяют напряженность поля магнитной цепи ;

б) по кривой намагничивания материала сердечника определяют магнитную индукцию B по вычисленному значению напряженности H ;

в) определяют магнитный поток цепи $\Phi = BS$.

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

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

Если задана магнитная индукция какого-либо участка $B_{уч}$, то находят магнитный поток этого участка $\Phi_{уч} = B_{уч}S_{уч}$, который для всех участков

неразветвленной цепи имеет одинаковое значение. Затем определяют магнитную индукцию остальных участков, как показано выше;

б) по кривым намагничивания материалов (Приложения 5, 6) определяют напряженности ферромагнитных участков H_1 и H_2 .

Напряженность в воздушном зазоре вычисляют по выражению ;

в) определив длину средней линии каждого участка, по закону полного тока (второй закон Кирхгофа для магнитной цепи), вычисляют намагничивающую силу рассчитываемой магнитной цепи, или ток I , или витки W .

Закон полного тока.

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

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

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

3.2 Применение законов Кирхгофа при расчете сложных цепей

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на метод контурных токов

Метод контурных токов

Метод основан на втором законе Кирхгофа. Вводят такое понятие как контурный ток – ток, протекающий во всех ветвях, образующих данный

контур. Количество уравнений при этом сокращается. Представим токи в ветвях через контурные.

$$\begin{aligned} I_{\kappa 1} \cdot (R_3 + R_1 + r_{01} + R_6) - I_{\kappa 2} \cdot R_3 - I_{\kappa 3} \cdot R_6 &= E_1 + E_3 \\ -I_{\kappa 1} \cdot R_3 + I_{\kappa 2} \cdot (R_5 + R_3 + R_2) - I_{\kappa 3} \cdot R_5 &= -E_3 \\ -I_{\kappa 1} \cdot R_6 - I_{\kappa 2} \cdot R_5 + I_{\kappa 3} \cdot (R_6 + R_4 + R_5) &= 0 \end{aligned}$$

3.3 Метод эквивалентных преобразований

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на методику

Преобразования считаются эквивалентными, если токораспределение в не преобразованной части схемы не изменилось.

$$I_1 \cdot (R_1 + R_{\text{экв}}) = E_1 \pm E_{\text{экв}}$$

$$I_1 = \frac{E_1 \pm E_{\text{экв}}}{(R_1 + R_{\text{экв}})}$$

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

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

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

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

Ток первой ветви определится:

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

3.4 Компенсация реактивной мощности

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

Мощность в цепи с резистивным элементом.

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

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

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

Мощность в цепи с индуктивным элементом.

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

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

Таким образом, ток в цепи с индуктивностью не совершает работу, он обуславливается лишь колебаниями энергии. Такой ток именуется

реактивным. Он бесполезно загружает источник и провода линии электропередач, следовательно, для электроэнергетики он является вредным.

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

$$Q = I^2 \cdot X_L, [\text{вар}].$$

Мощность в цепи с емкостным элементом.

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

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

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

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

Активная мощность потребителя определена формулой

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

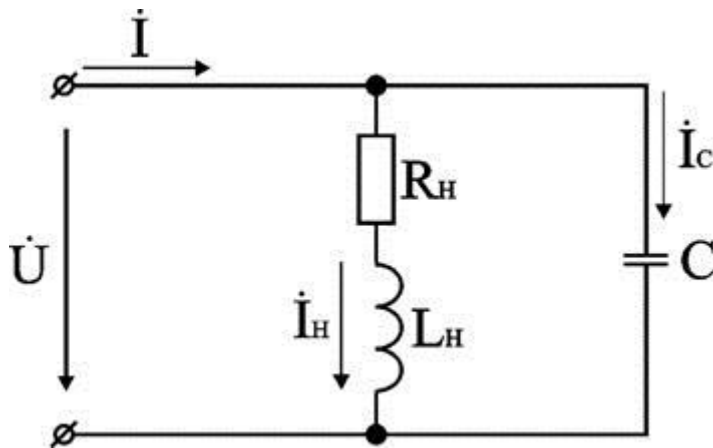
Величину $\cos \varphi$ здесь называют коэффициентом мощности. Ток в линии питающей потребителя с заданной мощностью P равен

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

и будет тем больше, чем меньше $\cos \varphi$. При этом возрастают потери в питающей линии. Для их снижения желательно увеличивать $\cos \varphi$.

Большинство потребителей имеет активно-индуктивную нагрузку.

Увеличение $\cos \varphi$ возможно путем компенсации индуктивной составляющей тока путем подключения параллельно нагрузке конденсатора (рис. 2.24).



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

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

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

(2.52)

$$I_{на} = I_H \cos \varphi_H = P_H / U$$

Реактивная составляющая нагрузки $I_{нр}$ может быть выражена через $\tan \varphi_H$

$$I_{нр} = I_{на} \tan \varphi_H.$$

При подключении емкости величина $I_{нр}$ уменьшается на величину I_C .

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

$$I_p = I_a \tan \varphi.$$

Уменьшение реактивной составляющей нагрузки с $I_{\text{нр}}$ до I_p определяет величину тока компенсирующей емкости

$$I_C = I_{\text{нр}} - I_p = I_a (\text{tg } \varphi_{\text{н}} - \text{tg } \varphi).$$

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

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

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

3.5 Методика расчета цепи трехфазного переменного тока при соединении нагрузки звездой без нейтрального провода.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на способы соединения трехфазной нагрузки в ТФЦ

В четырехпроводной системе трехфазного тока, включенной по схеме звезда, при симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе равен нулю. Следовательно, в этом случае от нейтрального провода можно отказаться, и четырехпроводная система при этом превращается в трехпроводную систему трехфазного тока (рис. 24.)

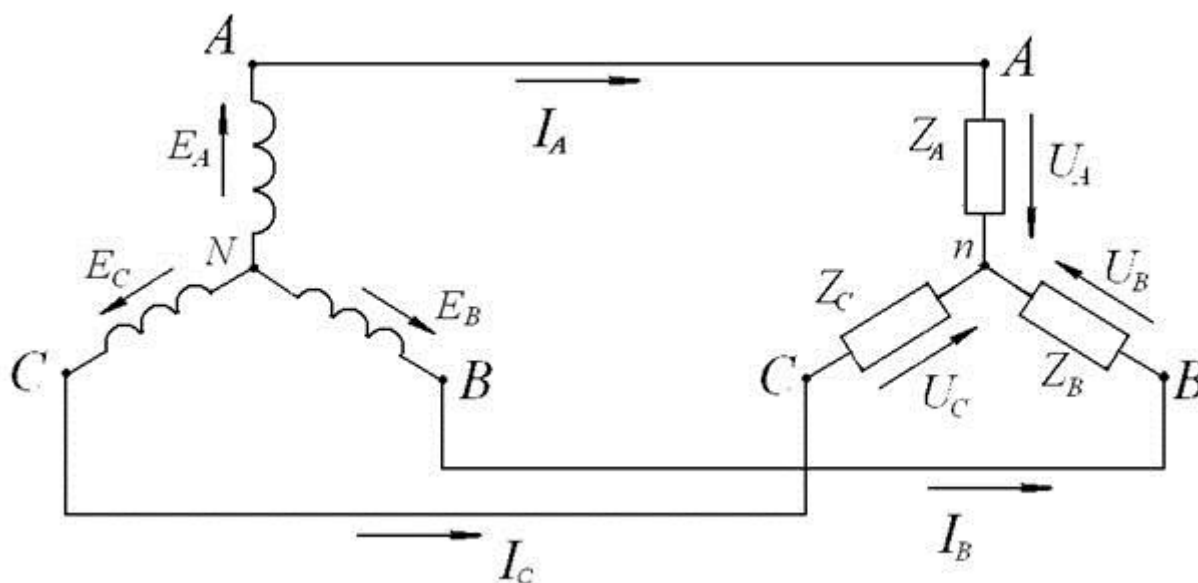


Рис.24. Трехпроводная система трехфазного переменного тока (соединение по схеме «звезда»).

Проанализируем электрическое состояние трехпроводной трехфазной системы, соединенной по схеме «звезда», при активной нагрузке.

1) Симметричная активная нагрузка: $Z_A = Z_B = Z_C = R_A = R_B = R_C = R$

$$\bar{U}_A = \bar{E}_A \quad \bar{U}_B = \bar{E}_B \quad \bar{U}_C = \bar{E}_C \quad \bar{U}_{nN} = 0$$

$$\bar{U}_A = \bar{U}_B = \bar{U}_C = \bar{U}_\phi$$

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = \bar{I}_N = 0$$

$$\bar{I}_A = \bar{I}_B = \bar{I}_C = \bar{I}_\phi = \frac{\bar{U}_\phi}{R}$$

Векторная диаграмма трехпроводной трехфазной системы «звезда» при симметричной активной нагрузке аналогична диаграмме, построенной для четырехпроводной системы с симметричной активной нагрузкой (рис.22).

2) Несимметричная активная нагрузка: $Z_A = R_A ; Z_B = R_B ; Z_C = R_C ; R_A \neq R_B \neq R_C ; I_A \neq I_B \neq I_C$

В трехпроводной системе, соединенной по схеме «звезда» при несимметричной нагрузке между нулевой точкой нагрузки и нулевой точкой генератора возникает напряжение U_{nN} , которое в случае активной нагрузки можно выразить следующим образом

$$\bar{U}_{nN} = \frac{\frac{\bar{E}_A}{R_A} + \frac{\bar{E}_B}{R_B} + \frac{\bar{E}_C}{R_C}}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}}. \quad (49)$$

Составим уравнения по второму закону Кирхгофа

$$\bar{U}_A = \bar{E}_A - \bar{U}_{nN}$$

$$\bar{U}_B = \bar{E}_B - \bar{U}_{nN} \quad (50)$$

$$\bar{U}_C \equiv \bar{E}_C - \bar{U}_{nN}.$$

-

Токи в фазах нагрузки определяются

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &\equiv \frac{\bar{U}_A}{Z_A} \equiv \frac{\bar{E}_A - \bar{U}_{nN}}{Z_A} \\ \bar{I}_B &\equiv \frac{\bar{U}_B}{Z_B} \equiv \frac{\bar{E}_B - \bar{U}_{nN}}{Z_B} \quad (51) \\ \bar{I}_C &\equiv \frac{\bar{U}_C}{Z_C} \equiv \frac{\bar{E}_C - \bar{U}_{nN}}{Z_C}\end{aligned}$$

Векторная диаграмма трехпроводной системы при несимметричной нагрузке представлена на рис.25. Из нее следует, что фазные напряжения нагрузки не представляют собой симметричную систему векторов, т.к. действующие значения этих напряжений не будут равны между собой, а их фазовый сдвиг относительно друг друга будет отличаться от 120°.

Проведя геометрическое сложение векторов $\frac{\bar{E}_A}{R_A}, \frac{\bar{E}_B}{R_B}, \frac{\bar{E}_C}{R_C}$ и разделив полученный результат на значение проводимости $Y \equiv \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}$,

-

в соответствии с выражением (49), получаем вектор \bar{U}_{nN} :

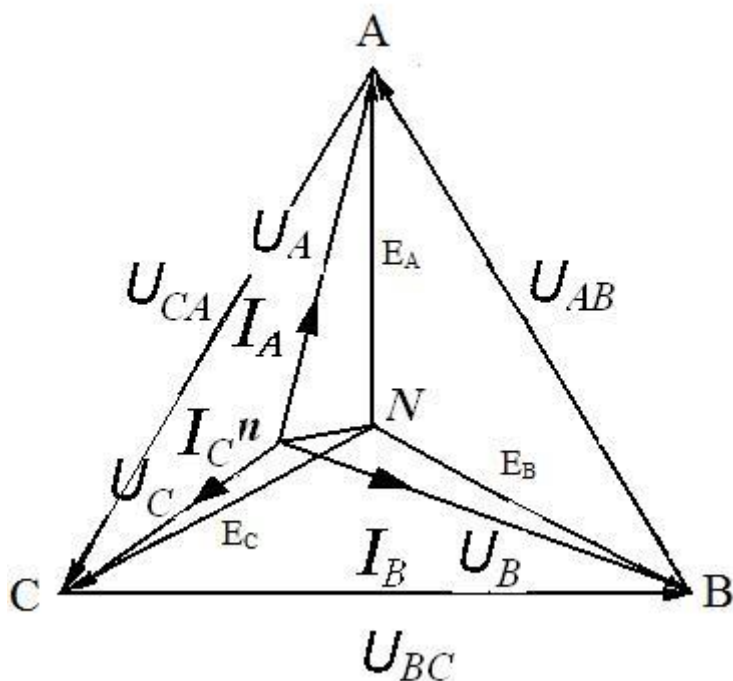


Рис.25. Топографическая векторная диаграмма трехпроводной трехфазной системы «звезда» при несимметричной активной нагрузке

Вычитая полученный результат из векторов $\underline{\bar{E}}_A$, $\underline{\bar{E}}_B$ и $\underline{\bar{E}}_C$, находим $\underline{\bar{U}}_A$, $\underline{\bar{U}}_B$ и $\underline{\bar{U}}_C$ в соответствии с выражением (50).

В результате получаем выражения для расчета действующих значений фазных напряжений U_A , U_B , U_C и токов I_A , I_B , I_C .

$$\underline{U}_A = \underline{U}_L \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{R_B^2} + \frac{1}{R_B \cdot R_C} + \frac{1}{R_C^2}}}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}} ; \underline{I}_A = \frac{\underline{U}_L}{R_A}$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_L \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{R_A^2} + \frac{1}{R_A \cdot R_C} + \frac{1}{R_C^2}}}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}} ; \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_L}{R_B}$$

$$U_C = U_{\text{Л}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{R_A^2} + \frac{1}{R_A \cdot R_B} + \frac{1}{R_B^2}}}{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}} ; I_C = \frac{U_{\text{Л}}}{R_C} \quad (52)$$

Для измерения мощности в работе используется метод двух ваттметров W_1 и W_2

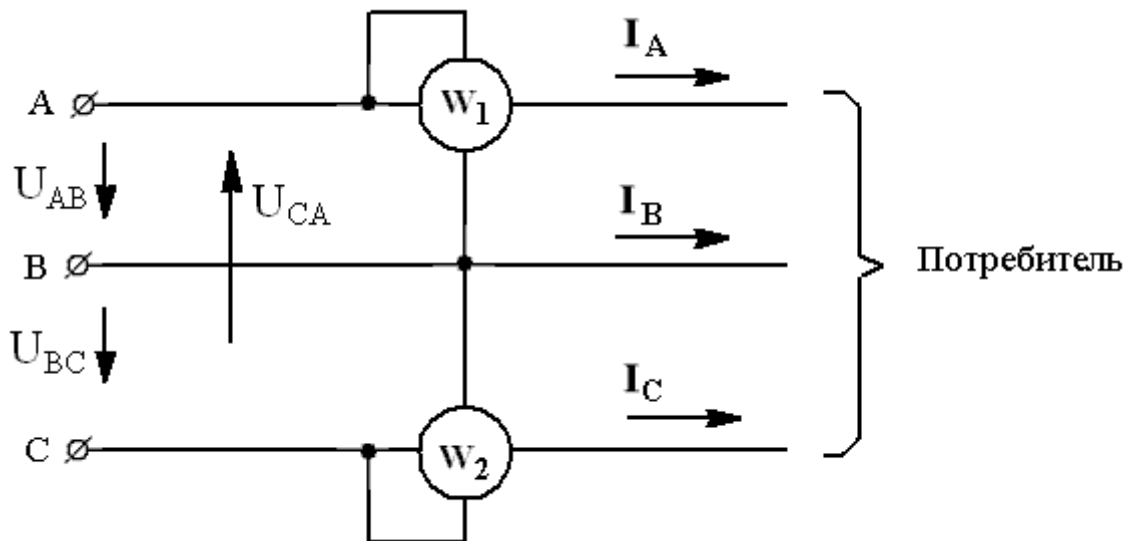


Рис.26. Схема измерения мощности методом двух ваттметров

Поясним принцип работы этого метода.

Приборы для измерения активной мощности (ваттметры), включенные в цепь однофазного переменного тока, измеряют величину

$P = U \cdot I \cdot \cos (U \wedge I)$, где U - напряжение, приложенное к обмотке напряжения ваттметра;

I - ток, протекающий по токовой обмотке ваттметра;

$U \wedge I = \varphi$ - угол сдвига между напряжением и током.

Активная мощность трехфазной цепи при симметричной нагрузке фаз может быть выражена двумя равноценными формулами

$$P = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi \text{ или}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos \varphi$$

Для измерения активной мощности в трехпроводных цепях трехфазного тока как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке фаз (независимо от способа соединения нагрузки «звездой» или «треугольником»), широкое практическое применение получил метод двух ваттметров, включенных как показано на рис.27.

Показания ваттметров W_1 и W_2 можно записать следующим образом

$$P_1 = U_{AB} \cdot I_A \cdot \cos (U_{AB} \wedge I_A)$$

$$P_2 = U_{CB} \cdot I_C \cdot \cos (U_{CB} \wedge I_C) \quad (55)$$

Обозначим через α и β соответственно углы $(U_{AB} \wedge I_A)$ и $(U_{CB} \wedge I_C)$. Для определения α и β построим векторную диаграмму для случая симметричной активно-индуктивной нагрузки (рис.27). Согласно построению $\alpha = 30^\circ + \varphi$, $\beta = 30^\circ - \varphi$.

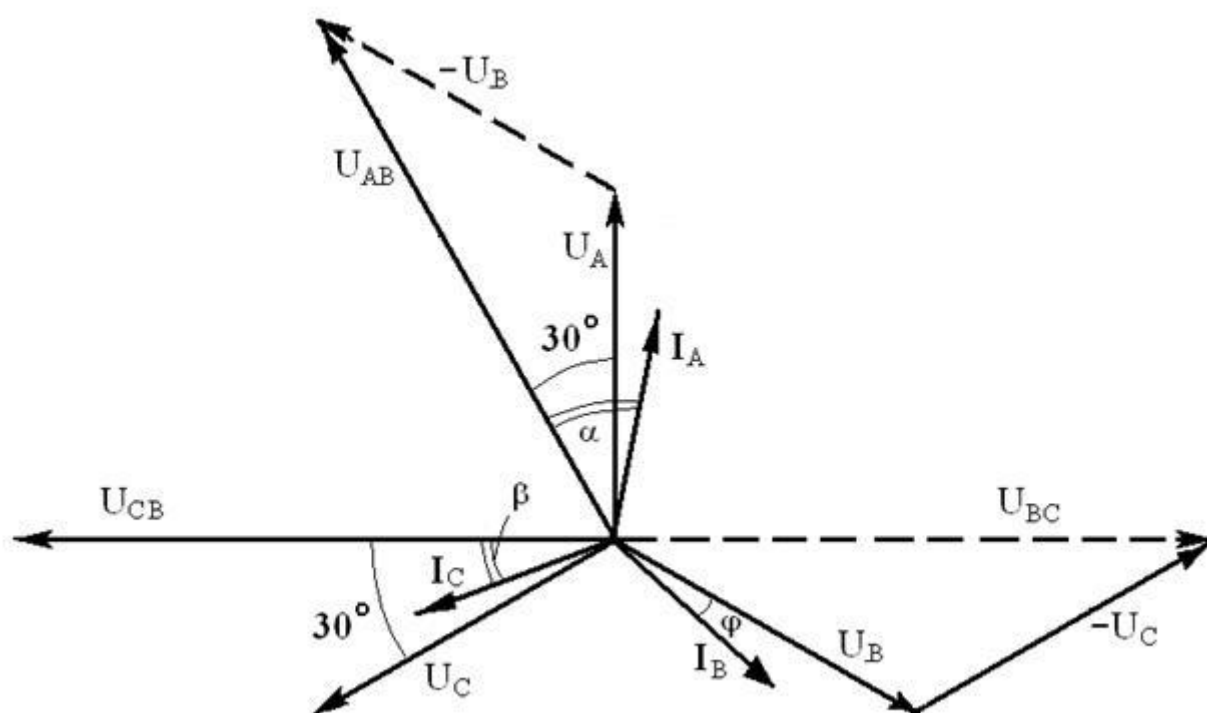


Рис.27. Векторная диаграмма трехпроводной системы трехфазного переменного тока с симметричной активно-индуктивной нагрузкой

-

Учитывая, что при симметричной нагрузке $U_{AB} = U_{CB} = U_L$ и $I_A = I_C = I_L$, показания ваттметров можно записать следующим образом:

$$P = P_1 + P_2 = U_L \cdot I_L \cdot [\cos (30^\circ + \varphi) + \cos (30^\circ - \varphi)] = \sqrt{3} U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi.$$

Полученное выражение совпадает с выражением (54). Таким образом, доказано, что сумма показаний двух ваттметров будет равна активной мощности трехфазной цепи.

Разность показаний двух ваттметров, умноженная на $\sqrt{3}$, будет равна реактивной мощности цепи Q .

$$Q = \sqrt{3} (P_1 - P_2) = \sqrt{3} U_L \cdot I_L \cdot [\cos(30^\circ + \varphi) - \cos(30^\circ - \varphi)] = \sqrt{3} U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi.$$

Показания каждого из ваттметров в отдельности не имеют никакого физического смысла, за исключением случая симметричной и чисто активной нагрузки, при которой $P_1 = P_2$ и составляет половину измеряемой мощности трехфазной цепи.

3.6 Уравнение намагничивающих сил трансформатора. Схема замещения трансформатора.

Номинальные первичные и вторичные токи определяются по номинальной мощности и соответствующим номинальным напряжениям:

для однофазного трансформатора

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном}};$$

для однофазного двухобмоточного трансформатора

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} U_{ном}},$$

где $I_{ном}$ - номинальный линейный ток, А; $U_{ном}$ - номинальное линейное напряжение, В; $P_{ном}$ - номинальная мощность, В·А.

Уравнение равновесия напряжений (для трехфазных трансформаторов на одну фазу) для первичной и вторичной обмоток соответственно имеют вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 x_2,$$

где r_1, x_1, r_2, x_2 - активные и индуктивные сопротивления соответственно для первичной и вторичной обмоток.

Уравнения напряжения трансформатора с приведенной вторичной обмоткой имеют вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' r_2' - j \dot{I}_2' x_2',$$

$$\dot{U}_2' = k \dot{U}_2; \quad \dot{E}_2' = k \dot{E}_2; \quad r_2' = k^2 r_2; \quad x_2' = k^2 x_2;$$

где $k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{w_1'}{w_2}$ - коэффициент трансформации, или приведения; $\omega_2' = \omega_1$ - число витков приведенной первичной обмотки.

Уравнение равновесия токов учитывает, что всякому приращению тока нагрузки во вторичной цепи соответствует увеличение тока в первичной обмотке, и записывается в виде

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2),$$

где $I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_a^2}$ - ток холостого хода; I_m - намагничивающая составляющая; I_a - активная составляющая (учет потерь в стали) тока холостого хода; $I'_2 = I_2/k$ - приведенный вторичный ток.

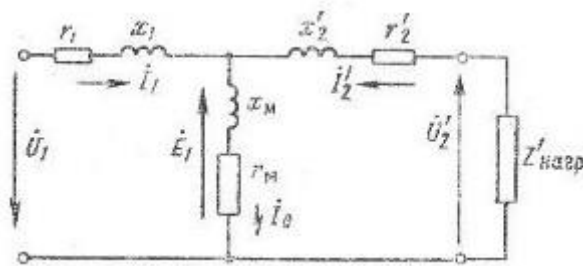


Рис. 2. Схема замещения двухобмоточного трансформатора

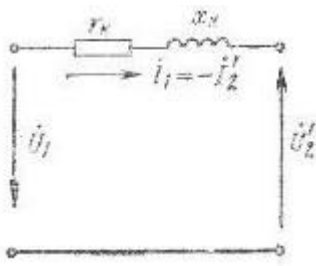


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная схема двухобмоточного трансформатора

Схема замещения двухобмоточного трансформатора представлена на рис. 2. В этой схеме $r_m + jx_m = z_m$ - сопротивление намагничивающего контура, где r_m учитывает потери стали сердечника, а x_m - реактивную мощность, затрачиваемую на создание магнитного потока Φ .

В режимах, когда можно пренебречь током холостого хода ($I_0 \approx 0$), схема замещения упрощается ($Z_m = \infty$) и приобретает вид, представленный на рис. 1.3.3. Параметры этой схемы $z_k = z_1 + z'_2$, $r_k = r_1 + r'_2$, $x_k = x_1 + x'_2$ называют соответственно полным, активным и индуктивным сопротивлениями короткого замыкания.

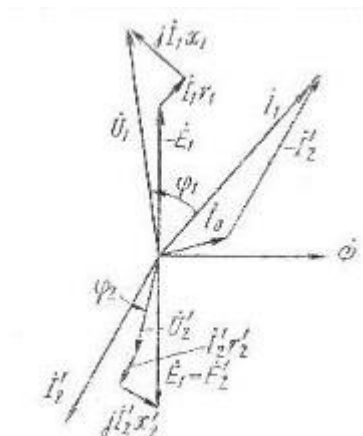


Рис. 4. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке.

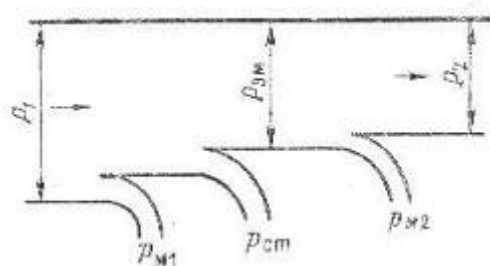


Рис. 5. Энергетическая диаграмма трансформатора

Векторная диаграмма трансформатора, соответствующая схеме замещения для случая активно-индуктивной нагрузки, приведена на рисунке

3.7 Синхронные генераторы и синхронные двигатели

Синхронный двигатель. Принцип действия и устройство.

Синхронный двигатель может работать в качестве генератора и двигателя. Синхронный двигатель выполнен так же, как и синхронный генератор. Его обмотка якоря 1 (рис. 1, а) подключена к источнику трехфазного переменного тока; в обмотку возбуждения 2 подается от постороннего источника постоянный ток. Благодаря взаимодействию вращающегося магнитного поля 4, созданного трехфазной обмоткой якоря, и поля, созданного обмоткой возбуждения, возникает электромагнитный момент M (рис. 1,б), приводящий ротор 3 во вращение. Однако в синхронном двигателе в отличие от

асинхронного ротор будет разгоняться до частоты вращения $n = n_1$, с которой вращается магнитное поле (до синхронной частоты вращения). Объяс

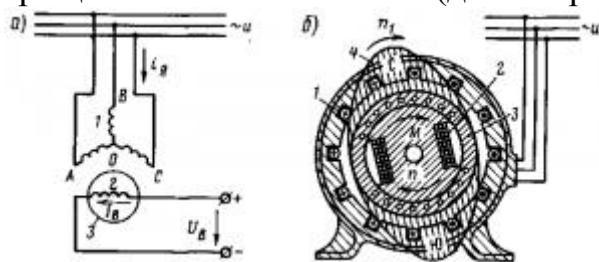


Рис. 1. Электрическая (а) и электромагнитная (б) схемы синхронного электродвигателя

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

Электромагнитный момент. Электромагнитный момент в синхронном двигателе возникает в результате взаимодействия магнитного потока ротора (потока возбуждения Φ_B) с вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазным током, протекающим по обмотке якоря (поток якоря Φ_A). 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. 2, в и г) ее ротор под действием приложенного к валу внешнего нагрузочного момента $M_{вн}$ смещается на некоторый угол θ против направления вращения. В этом случае в результате электромагнитного взаимодействия между ротором и статором создаются электромагнитные силы I , направленные по направлению вращения, т. е. образуется вращающий электромагнитный момент M , который стремится преодолеть действие внешнего момента $M_{вн}$. 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 θ

по направлению вращения. При этом создаются электромагнитные силы, направленные против вращения, т. е. образуется тормозной электромагнитный момент M . Таким образом, при изменении значения и направления внешнего момента на валу ротора $M_{вн}$ изменяется лишь угол ? 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

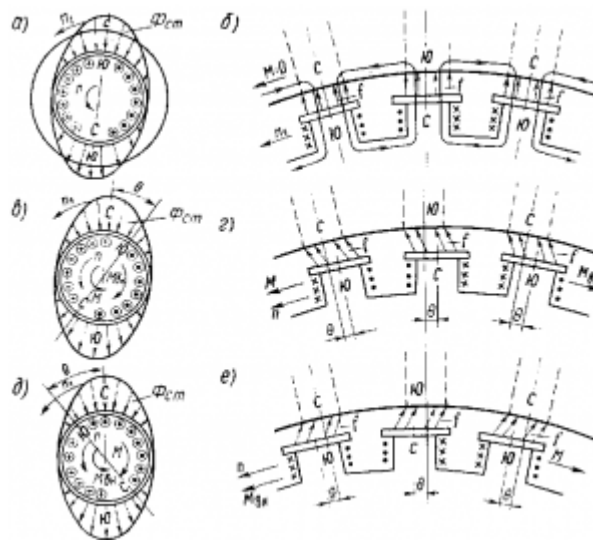


Рис. 2. Электромагнитный момент в синхронной машине, образующийся в различных режимах

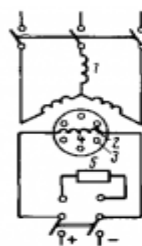


Рис. 293

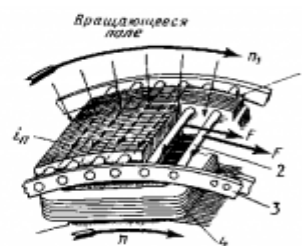


Рис. 294

Рис. 3. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя;

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

3.8 Электронные генераторы.

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

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

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

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

Генераторы синусоидальных колебаний

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



Рис1

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

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

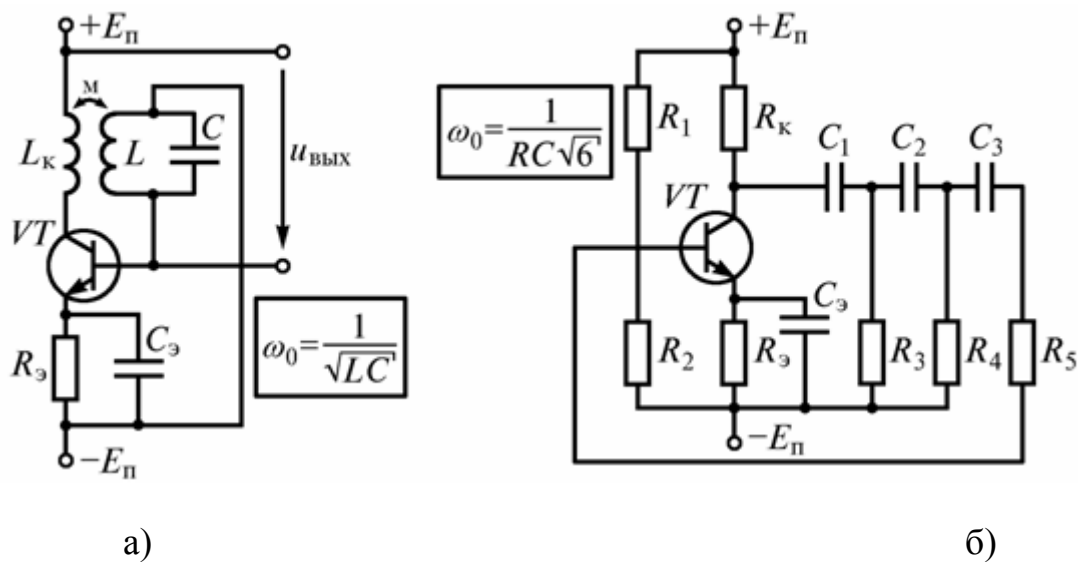


Рис. 2

Схема LC -генератора (рис.2 а) объединяет однокаскадный делитель на транзисторе VT и колебательный контур LC, включенный в цепь положительной обратной связи генератора. Подбором L и C устанавливают требуемую частоту колебаний ω_0 . После включения источника питания $E_п$ в контуре LC возникают колебания и переменный ток базы $i_б$ усиливается транзистором. Протекающий через катушку ток коллектора $i_к$ создает на ней падение напряжения, которое в противофазе (вследствие встречного включения катушек $L_к$ 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° . Это осуществляют тремя RC-элементами, каждый из которых позволяет получить фазовый сдвиг на 60° . Несмотря на усложнение схемы генератора, она проста в реализации, особенно для низких частот, так как не требует индуктивных катушек, имеющих большие габариты и массу.

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).

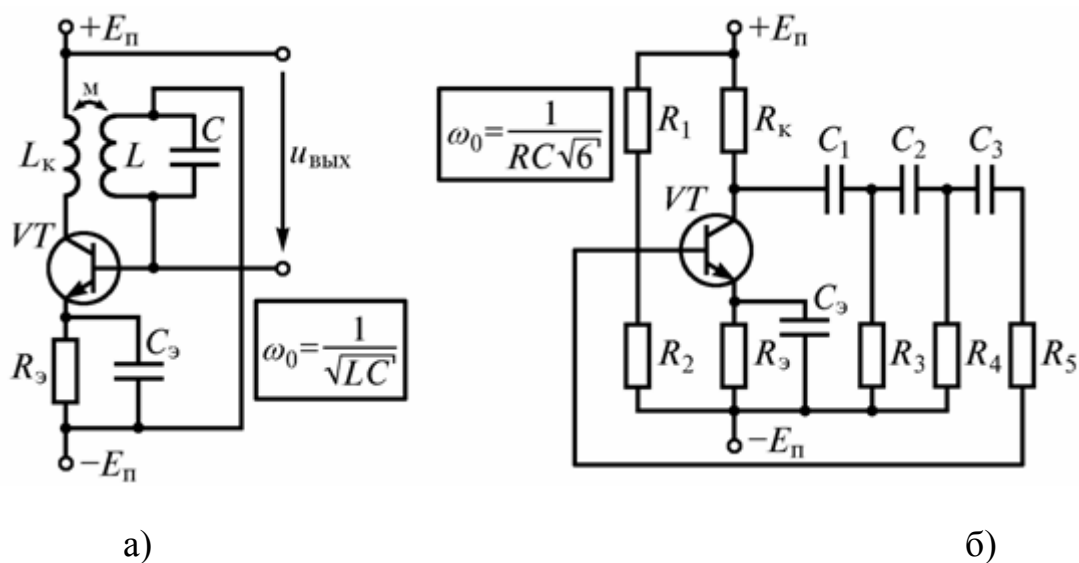


Рис. 2

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 ω_0 . После включения источника питания E_{π} в контуре LC возникают колебания и переменный ток базы i_b усиливается транзистором. Протекающий через катушку ток коллектора i_k создает на ней падение напряжения, которое в противофазе (вследствие встречного включения катушек L_k и L) за счет индуктивной связи между катушками подается в колебательный контур. Амплитуда колебаний постепенно возрастает до определенного значения (насыщения транзистора) и в дальнейшем не изменяется.

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

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

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

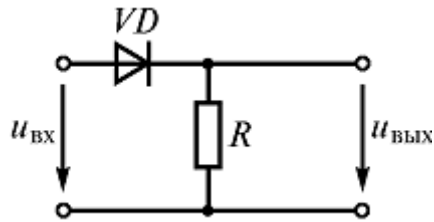
Чтобы получить одинаковые фазы выходного и входного напряжений, необходимо напряжение на RC-цепи сдвинуть на 180° . Это осуществляют тремя RC-элементами, каждый из которых позволяет получить фазовый сдвиг на 60° . Несмотря на усложнение схемы генератора, она проста в реализации, особенно для низких частот,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

3.9 Электронные ключи. Электронные реле

Электронные ключи

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

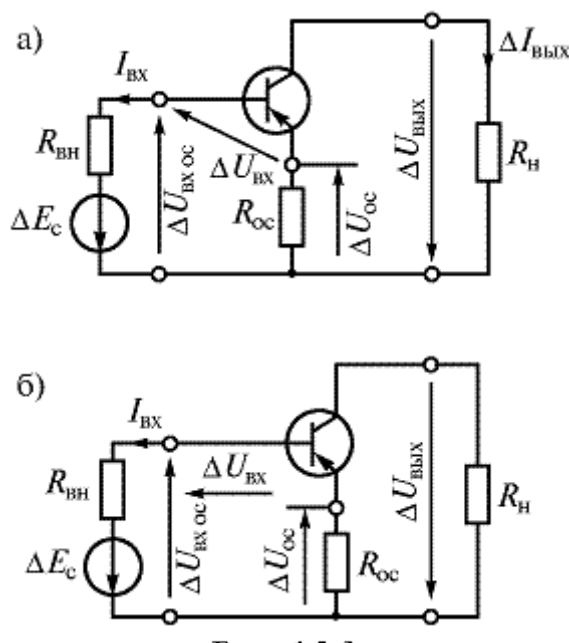
В статическом режиме ключ может находиться либо в замкнутом состоянии (включенном), либо в разомкнутом (выключенном). Основу любого ключа составляет активный элемент (диод, транзистор, тиристор), работающий в ключевом режиме.



Электронные ключи характеризуют следующими параметрами: переключательной характеристикой, представляющей собой

Рис .1

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



помехоустойчивостью и мощностью, потребляемой от источника питания.

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

Рис. 2

Диодные ключи применяют в основном для ограничения амплитуд напряжения.

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

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

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

такого ключа является сохранение напряжения в течение некоторого времени на его выходе после исчезновения входного импульса.

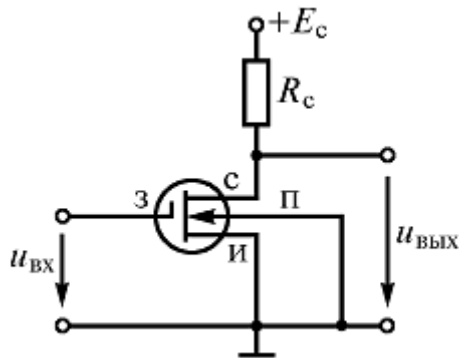


Рис. 3

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

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

коллектора быстро уменьшается.

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

Триггеры

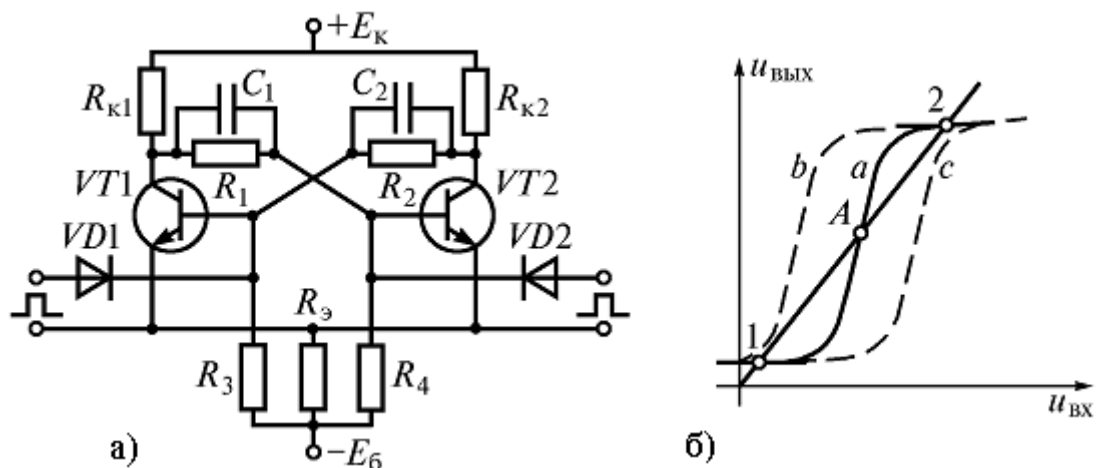


Рис. 4

Электронное устройство, имеющее два устойчивых стационарных состояния, в котором переходы из одного состояния в другое и обратно осуществляются под действием запускающих импульсов, называется триггером. Триггер содержит два транзистора, включенных по схеме с

общим эмиттером и образующих двухэлементный усилитель постоянного тока, охваченный положительной обратной связью по напряжению (рис. 4 а).

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

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

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

Электронные реле

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

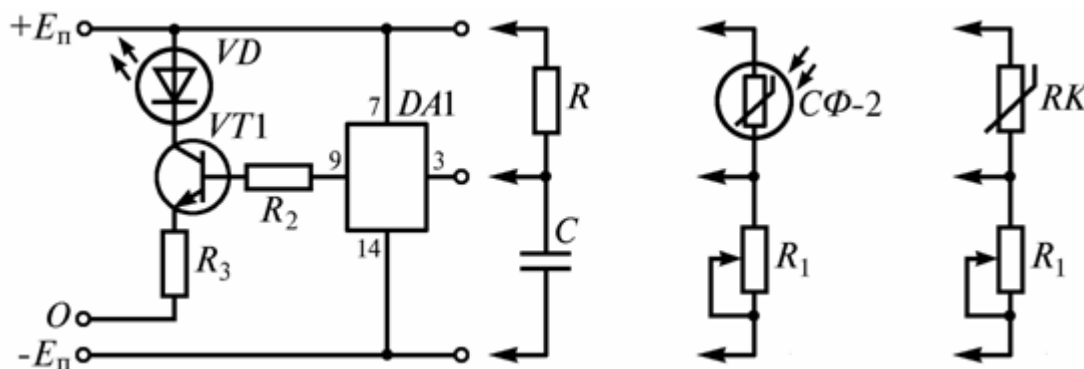


Рис. 5 (а,б,в)

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

При подключении RC-цепи к источнику постоянного напряжения начинает заряжаться конденсатор. Как только напряжение на нем достигает значения, достаточного для срабатывания усилителя, на его выходе появляется напряжение U . Продолжительность выдержки реле определяется постоянной времени заряда конденсатора $\tau = RC$. По истечении времени $t = 3\tau$ напряжение на конденсаторе становится почти равным U ($U_c = 0,95U$), а продолжительность выдержки (с) реле

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

где $U_{\text{ср}}$ – напряжение срабатывания реле.

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

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

В схеме теплового реле (рис.5 в) чувствительным к температуре элементом является терморезистор – резистор, сопротивление которого в большей мере зависит от температуры окружающей среды. Изменение сопротивления терморезистора под действием температуры ведет к изменению напряжения на нем. Это напряжение поступает на вход усилителя. Чувствительность теплового реле, как и фотореле, регулируют переменным резистором R_1 .

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

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАНЯТИЯМ

4.1 Лабораторное занятие №1 «Электробезопасность»

Вопросы к занятию

1. Опасность поражения электрическим током
2. Защита от поражения электрическим током
3. Заземление и зануление
4. Приемы оказания первой помощи пострадавшему от электрического тока
5. Электробезопасность на животноводческих фермах

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на ключевых моментах и на более сложных из них для лучшего запоминания.

При подготовке к занятию необходимо обратить внимание на мероприятия электробезопасности на животноводческих фермах.

4.2 Лабораторное занятие №2 «Электрические измерения и приборы»

Вопросы к занятию

1. Системы электрических измерительных приборов
2. Основные характеристики электрических измерительных приборов
3. Измерение тока, напряжения и мощности

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на способы расширения пределов измерения электроизмерительных приборов

4.3 Лабораторное занятие №3 «Исследование законов Кирхгофа и принципа наложения в сложной электрической цепи постоянного тока»
(выполняется на компьютерах с использованием программ Multisim)

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.

4.4 Лабораторное занятие №4 «Исследование цепи постоянного тока с последовательным и параллельным включением элементов»

Вопросы к занятию

1. Системы электрических измерительных приборов
2. Основные характеристики электрических измерительных приборов
3. Измерение тока, напряжения и мощности

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на способы расширения пределов измерения электроизмерительных приборов.

4.5 Лабораторное занятие №5 «Исследование сложной цепи постоянного тока со смешанным соединением элементов»

Вопросы к занятию

1. Принципы графического изображения электрической цепи.
2. Методы расчета простых электрических цепей.
3. Научиться включать в цепь электроизмерительные приборы, выбирать и устанавливать пределы измерений и производить измерения.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на условия применения первого и второго законов Кирхгофа при расчете сложных электрических цепей, метода эквивалентные преобразования

4.6 Лабораторное занятие №6 «Исследование простых цепей синусоидального переменного тока»

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

4.7 Лабораторное занятие №7 «Исследование резонансных явлений в цепи переменного тока. Резонанс напряжения»

Вопросы к занятию

1. Изучение режима резонанса напряжений в неразветвленной цепи переменного тока.
2. Изучение методики расчета параметров неразветвленной цепи синусоидального переменного тока.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на условия возникновения резонанса напряжений.

4.8 Лабораторное занятие №8 «Исследование резонансных явлений в цепи переменного тока. Резонанс тока»

Вопросы к занятию

1. Изучение режима резонанса токов в разветвленной цепи переменного тока.
2. Изучение методики расчета параметров разветвленной цепи синусоидального переменного тока.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на условия возникновения резонанса токов.

4.9 Лабораторное занятие №9 «Исследование цепи переменного тока»

Вопросы к занятию

1. Исследование режима работы цепи переменного тока с активными, индуктивными и емкостными элементами.
2. Освоение методов расчета электрической цепи переменного тока с активными, индуктивными и емкостными элементами и экспериментального определения параметров ее элементов.

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.

4.10 Лабораторное занятие №10 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока с однофазным приемником»

Вопросы к занятию

1. Изучить способы соединения однофазных потребителей в трехфазных системах. Освоить методы измерения и расчета электрических величин в системах трехфазного тока.

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

4.11 Лабораторное занятие №11 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при включении нагрузки звездой»

Вопросы к занятию

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

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

4.12 Лабораторное занятие №12 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока при включении нагрузки треугольником»

Вопросы к занятию

1. Изучение режимов работы трехфазной цепи переменного тока при соединении потребителей треугольником.

2. Изучение методики расчета трехфазной цепи синусоидального переменного тока при соединении потребителей треугольником.

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

4.13 Лабораторное занятие №13 «Исследование трехфазной электрической цепи переменного тока с трехфазным приемником»

Вопросы к занятию

1. Изучить способы соединения трехфазных потребителей в трехфазных системах.

2. Освоить методы измерения и расчета электрических величин в системах трехфазного тока.

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

4.14 Лабораторное занятие №14 «Включение трехфазного асинхронного электродвигателя в трехфазную систему»

Вопросы к занятию

1. Изучить конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя с коротко замкнутым ротором.

2. Исследовать работу электродвигателя в нормальном и аварийных режимах.

3. Научиться маркировать выводы трехфазного асинхронного электродвигателя.

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

4.15 Лабораторное занятие №15 «Включение трехфазного трансформатора в трехфазную систему »

Вопросы к занятию

1.Маркировка выводов трехфазного трансформатора

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на вопросы конструкции трехфазного трансформатора

4.16Лабораторное занятие №16 «Исследование и расчет параметров схемы замещения воздушного трансформатора»

Вопросы к занятию

1. Исследовать режимы работы воздушного трансформатора при активной нагрузке.
2. Научиться определять параметры трансформатора по результатам испытаний.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на диаграмме энергетических потерь трансформатора, расчетах параметров схемы замещения трансформатора

4.17Лабораторное занятие №17 «Неуправляемые двухполупериодные выпрямители»

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

4.18 Лабораторное занятие №18 «Усилитель постоянного тока»

Вопросы к занятию

- 1 Изучить схемы и характеристики усилителей постоянного тока.
- 2 Экспериментально снять амплитудные и частотные характеристики усилителя при изменении глубины обратной связи.

При подготовке к вопросам акцентировать внимание необходимо на схемы усилителей постоянного тока