

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Т.Н. Мармус, Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие
для выполнения контрольных работ

Благовещенск
Издательство ДальГАУ
2012

УДК 621.3

Учебное пособие «Электротехника и электроника» составлено

Мармус Т.Н., Горбуновой Л.Н., Гусевой С.А.

Учебное пособие предназначено для выполнения контрольных работ студентами заочного обучения ИЗДПО по направлениям: 110800.62 – агроинженерия (технологические системы в агробизнесе); 190600.62 – эксплуатация транспортно – технологических машин и комплексов; 250300.62 – технология и оборудование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств; 260100.62 – продукты питания из растительного сырья; 260200.62 – продукты питания животного происхождения; 260800.62 – технология продукции и организации общественного питания; 270800.62 – строительство; 280100.62 – природообустройство и водопользование в соответствии с требованиями ФГОС ВПО по дисциплине «Электротехника и электроника».

Рецензент Ижевский А.С. зав. кафедрой ЭА АПК и ЭТ и А, доцент, к.с-х.н.

Рекомендовано к печати в издательстве ФГБОУ ВПО ДальГАУ методическим советом института электрификации и автоматизации сельского хозяйства (протокол № 9 от 14 мая 2012 г.).

Издательство ДальГАУ

2012

Правила оформления контрольной работы

Контрольная работа оформляется аккуратно, без исправлений, на одной стороне листа белой бумаги формата А4 и в соответствии с ГОСТом. Текст пишется от руки четким шрифтом пастой черного или синего цвета или печатным шрифтом Times New Roman 14. Расстояние между строчками 1 см или для печатного текста 1,5 интервала. По всем четырём сторонам листа оставляются поля. Ширина полей: верхнее и нижнее - 20 мм, левое - 30 мм, правое - 10 мм. Страница должна содержать не менее 28 строк.

Работы, оформленные небрежно, вызывающие затруднения и сомнения при их прочтении, возвращаются на переработку.

Все формулы и расчеты записываются в системе СИ, с обязательными пояснениями. Для обозначения единиц физических величин используются только стандартные сокращения после числового значения, при использовании единицы измерения в тексте название пишется полностью (правильно – 150 Вт; неправильно – измеряется в Вт).

Схемы, векторные диаграммы и графики должны выполняться только с использованием чертежных инструментов. При выполнении схем необходимо использовать обозначения в соответствии с ГОСТом. Каждый рисунок должен быть пронумерован и иметь подрисуючную надпись. Рисунок вносится в текст после первой ссылки на него. Графики выполняются на миллиметровой бумаге с указанием масштаба построения.

1 Электрические цепи постоянного тока

1.1 Закон Ома. Сопротивление

Электрический ток - это направленное движение носителей зарядов.

Сила тока определяется количеством электричества (зарядом), проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (1.1)$$

Единицей силы тока является ампер (А):

$$1A = \frac{1Kл}{1с}. \quad (1.2)$$

Плотность тока (А/мм²)

$$J = \frac{I}{S}, \quad (1.3)$$

где I – ток в проводнике, А;

S – площадь поперечного сечения, мм².

Закон Ома для участка цепи: ток, проходящий по участку цепи, прямо пропорционален напряжению U и обратно пропорционален сопротивлению R , то есть

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.4)$$

где U – напряжение в вольтах (В),

R – сопротивление в Омах (Ом).

Закон Ома для всей цепи

$$I = \frac{E}{(R + r)}, \quad (1.5)$$

где E – электродвижущая сила источника электрической энергии, В;

R – сопротивление внешней цепи, Ом;

r – внутреннее сопротивление источника, Ом.

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью и выражается в сименсах (См), $\frac{1}{Ом} = 1См$.

$$g = \frac{1}{R}. \quad (1.6)$$

Сопротивление провода

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (1.7)$$

где ρ – удельное сопротивление, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения провода, мм^2 .

Величину, обратную удельному сопротивлению, называют удельной проводимостью, $\frac{\text{м}}{(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)}$

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (1.8)$$

1.2 Энергия и мощность электрической цепи

Работа (Дж), затраченная на перенос заряда на участке цепи за время t ,

$$A = U \cdot q, \text{ или } A = U \cdot I \cdot t. \quad (1.9)$$

Работа, совершаемая источником электрической энергии с ЭДС,

$$A = E \cdot q = E \cdot I \cdot t. \quad (1.10)$$

Мощность, потребляемая нагрузкой, Вт

$$P = \frac{A}{t} = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R}. \quad (1.11)$$

Мощность, развиваемая источником или генератором,

$$P_{\text{ист}} = E \cdot I \quad (1.12)$$

По закону сохранения энергии мощность генератора равна сумме мощностей потребителей. Это равенство называют балансом мощностей в электрических цепях

$$P_{\text{ист}} = \sum_{n=1}^i P_{\text{потр}}, \text{ или } E \cdot I = \sum_{n=1}^i I^2 \cdot R_i. \quad (1.13)$$

1.3 Закон Джоуля-Ленца

Количество теплоты (Дж), выделенное при прохождении постоянного тока в проводнике,

$$q = I^2 \cdot R \cdot t. \quad (1.14)$$

1.4 Последовательное, параллельное и смешанное соединение резисторов

Эквивалентное сопротивление ряда последовательно соединенных резисторов (рис 1.1) равно сумме их сопротивлений:

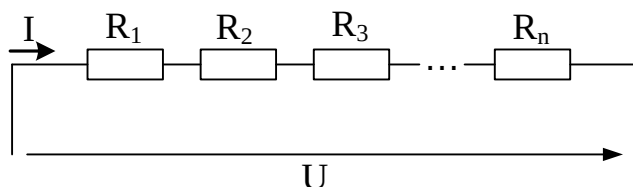


Рис. 1.1 – Последовательное соединение резисторов.

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n, \quad (1.15)$$

$$I = \text{const}, \quad U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n. \quad (1.16)$$

Параллельным называется такое соединение резисторов, при котором между двумя узлами электрической цепи присоединено несколько резисторов (рис 1.2). Эквивалентная проводимость этого участка цепи равна сумме проводимостей всех параллельных ветвей:

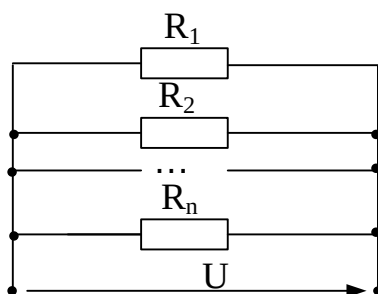


Рис. 1.2 – Параллельное соединение резисторов.

$$g_{\text{экв}} = g_1 + g_2 + \dots + g_n, \quad (1.17)$$

или

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (1.18)$$

Смешанное соединение резисторов – это последовательно-параллельное соединение резисторов или участков цепи.

1.5 Первый закон Кирхгофа

Сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла (рис. 1.1), или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю

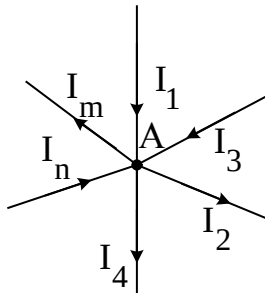


Рис. 1.3 – Узел электрической цепи

$$I_1 + I_3 + \dots + I_n = I_2 + I_4 + \dots + I_m, \quad (1.19)$$

где $I_1, I_3, \dots, I_n$ – токи, направленные к узлу;
 $I_2, I_4, \dots, I_m$ – токи, направленные от узла,

или

$$\sum_{n=1}^i I_i = 0. \quad (1.20)$$

Со знаком «+» записываются токи, направленные к узлу, со знаком «-» – от узла.

1.6 Второй закон Кирхгофа

В замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре.

Для активного контура

$$\sum_{n=1}^i E_i = \sum_{n=1}^i I_i \cdot R_i. \quad (1.21)$$

Для пассивного контура

$$\sum_{n=1}^i I_i \cdot R_i = 0. \quad (1.22)$$

При составлении уравнений по этому закону ЭДС источника записывается со знаком «+», если ее направление совпадает с направлением обхода контура. Падение напряжения записывают со знаком «+», если направление тока через резистор совпадает с выбранным направлением обхода контура.

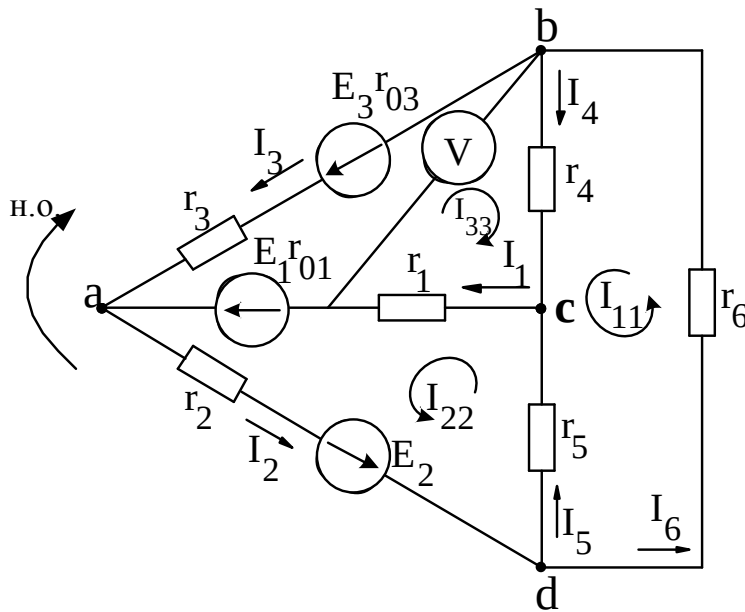
ПРИМЕР 1.

Рис. 1.4. Исходная схема

Дано:

$$E_1 = 20 \text{ В};$$

$$E_2 = 22 \text{ В};$$

$$E_3 = 9 \text{ В};$$

$$r_{01} = 0,1 \text{ Ом};$$

$$r_{03} = 1,1 \text{ Ом};$$

$$r_1 = 1 \text{ Ом};$$

$$r_2 = 2 \text{ Ом}; r_3 = 6 \text{ Ом};$$

$$r_4 = 3 \text{ Ом}; r_5 = 8 \text{ Ом};$$

$$r_6 = 4 \text{ Ом}.$$

Найти: 1) токи, действующие в ветвях цепи, 2) показания вольтметра, 3) составить баланс мощностей; 4) построить потенциальную диаграмму.

1) составляем систему уравнений, необходимых для определения токов по законам Кирхгофа

Произвольно задаемся положительными направлениями токов в ветвях и направлением обхода (в данном случае по часовой стрелке). Число необходимых уравнений для электрической цепи равно числу ветвей, $b=6$.

Составляем уравнения по первому закону Кирхгофа, которые на единицу меньше числа узлов, то есть $y-1 = 4-1 = 3$. Запишем уравнение для узлов "a", "b", "c". Токи, направленные к узлу, возьмём условно со знаком «+», а от узла - со знаком «-».

$$\left. \begin{array}{l} \text{узел "a"} \quad I_1 - I_2 + I_3 = 0; \\ \text{узел "b"} \quad -I_3 - I_4 + I_6 = 0; \\ \text{узел "c"} \quad -I_1 + I_4 + I_5 = 0. \end{array} \right\}$$

Недостающее число уравнений, то есть $b-(y-1)$ составляем по второму закону Кирхгофа

$$\left. \begin{array}{lll} \text{контур} & "abca" & I_1(r_1 + r_{01}) - I_3(r_3 + r_{03}) + I_4r_4 = E_1 - E_3; \\ \text{контур} & "adca" & -I_1(r_1 + r_{01}) - I_2r_2 - I_5r_5 = -E_1 - E_2; \\ \text{контур} & "bcdcb" & -I_4r_4 + I_5r_5 - I_6r_6 = 0. \end{array} \right\}$$

Решая полученную систему из шести уравнений, можно определять токи в ветвях.

Если какой-либо ток в результате расчёта получается отрицательным, то это означает, что его действительное направление противоположно произвольно выбранному.

2) определяем токи во всех ветвях схемы методом контурных токов и записываем уравнения в матричной форме

Метод заключается в том, что вместо действительных токов в ветвях на основании 2-го закона Кирхгофа определяем контурные токи в независимых контурах.

Задаёмся направлением контурных токов (рис 1.4).

Тогда действительные токи в ветвях внешних контуров равны

$$I_2 = I_{22}; \quad I_3 = I_{33}; \quad I_6 = I_{11}.$$

Токи на участках смежных ветвей равны

$$I_1 = I_{22} + I_{33}; \quad I_4 = I_{11} + I_{33}; \quad I_5 = I_{22} - I_{11}.$$

Для каждого контура составляем уравнение по 2-му закону Кирхгофа.

$$\left. \begin{array}{l} I_{11}(r_4 + r_5 + r_6) - I_{22}r_5 + I_{33}r_4 = 0; \\ -I_{11}r_5 + I_{22}(r_1 + r_{01} + r_2 + r_5) + I_{33}(r_1 + r_{01}) = E_1 + E_2; \\ I_{11}r_4 + I_{22}(r_1 + r_{01}) + I_{33}(r_1 + r_{01} + r_3 + r_{03} + r_4) = E_1 - E_3. \end{array} \right\}$$

Подставляем значения сопротивлений и ЭДС и решаем полученную систему уравнений

$$\left. \begin{array}{l} I_{11}(3 + 8 + 4) - I_{22} \cdot 8 + I_{33} \cdot 3 = 0; \\ -I_{11} \cdot 8 + I_{22}(1 + 0,1 + 2 + 8) + I_{33}(1 + 0,1) = 20 + 22; \\ I_{11} \cdot 3 + I_{22}(1 + 0,1) + I_{33}(1 + 0,1 + 6 + 1,1 + 3) = 20 - 9. \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \left. \begin{aligned} I_{11} \cdot 15 - I_{22} \cdot 8 + I_{33} \cdot 3 &= 0; \\ -I_{11} \cdot 8 + I_{22} \cdot 11,1 + I_{33} \cdot 1,1 &= 42; \\ I_{11} \cdot 3 + I_{22} \cdot 1,1 + I_{33} \cdot 11,2 &= 11. \end{aligned} \right\}$$

Система уравнений решается методом определителей. Для этого составляется главный определитель системы (детерминант):

$$\Delta = \begin{vmatrix} 15 & -8 & 3 \\ -8 & 11,1 & 1,1 \\ 3 & 1,1 & 11,2 \end{vmatrix} = (15 \cdot 11,1 \cdot 11,2) + (-8 \cdot 1,1 \cdot 3) + (-8 \cdot 1,1 \cdot 3) - \\ - (3 \cdot 11,1 \cdot 3) - (1,1 \cdot 1,1 \cdot 15) - (-8 \cdot -8 \cdot 11,2) = 977,15.$$

Находим частные определители системы уравнений, заменяя в главном определителе соответствующие столбцы сопротивлений столбцом контурных ЭДС:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & -8 & 3 \\ 42 & 11,1 & 1,1 \\ 11 & 1,1 & 11,2 \end{vmatrix} = (0 \cdot 11,1 \cdot 11,2) + (-8 \cdot 1,1 \cdot 11) + (42 \cdot 1,1 \cdot 3) - \\ - (11 \cdot 11,1 \cdot 3) - (42 \cdot -8 \cdot 11,2) - (1,1 \cdot 1,1 \cdot 0) = 3438,7;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 15 & 0 & 3 \\ -8 & 42 & 1,1 \\ 3 & 11 & 11,2 \end{vmatrix} = (15 \cdot 42 \cdot 11,2) + (-8 \cdot 11 \cdot 3) + (0 \cdot 1,1 \cdot 3) - \\ - (3 \cdot 42 \cdot 3) - (-8 \cdot 0 \cdot 11,2) - (11 \cdot 1,1 \cdot 15) = 6232,5;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 15 & -8 & 0 \\ -8 & 11,1 & 42 \\ 3 & 1,1 & 11 \end{vmatrix} = (15 \cdot 11,1 \cdot 11) + (-8 \cdot 42 \cdot 3) + (-8 \cdot 1,1 \cdot 0) - \\ - (3 \cdot 11,1 \cdot 0) - (-8 \cdot -8 \cdot 11) - (1,1 \cdot 42 \cdot 15) = -573,5.$$

Контурные токи системы будут

$$I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{3438,7}{977,15} = 3,519 A;$$

$$I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{6232,5}{977,15} = 6,378 A;$$

$$I_{33} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = -\frac{573,5}{977,15} = -0,587 A;$$

Находим значения действительных токов в ветвях схемы и их истинное направление:

$$I_2 = I_{22} = 6,378 \text{ A}; \quad I_1 = I_{22} + I_{33} = 6,378 - 0,587 = 5,791 \text{ A};$$

$$I_3 = I_{33} = -0,587 \text{ A}; \quad I_5 = I_{22} - I_{11} = 6,378 - 3,519 = 2,859 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{11} = 3,519 \text{ A}; \quad I_4 = I_{11} + I_{33} = 3,519 - 0,587 = 2,932 \text{ A};$$

Действительное направление тока I_3 противоположно принятому в схеме.

3) проверяем правильность решения, применив метод узлового напряжения

Метод применяется для расчета электрических цепей с двумя узлами, между которыми включены активные или пассивные ветви. Идея метода состоит в том, что по расчетной формуле определяется напряжение между узлами, называемое узловым напряжением. Затем по закону Ома рассчитываются токи в ветвях.

В данной задаче необходимо преобразовать треугольник, состоящий из сопротивлений r_4, r_5, r_6 (рис.1.5, а), в эквивалентную звезду r_b, r_c, r_d (рис.1.5, б). Треугольник сопротивлений и звезда считаются эквивалентными, если после замены одних сопротивлений другими токи и напряжения неразветвленной части цепи не изменяют своей величины и направления.

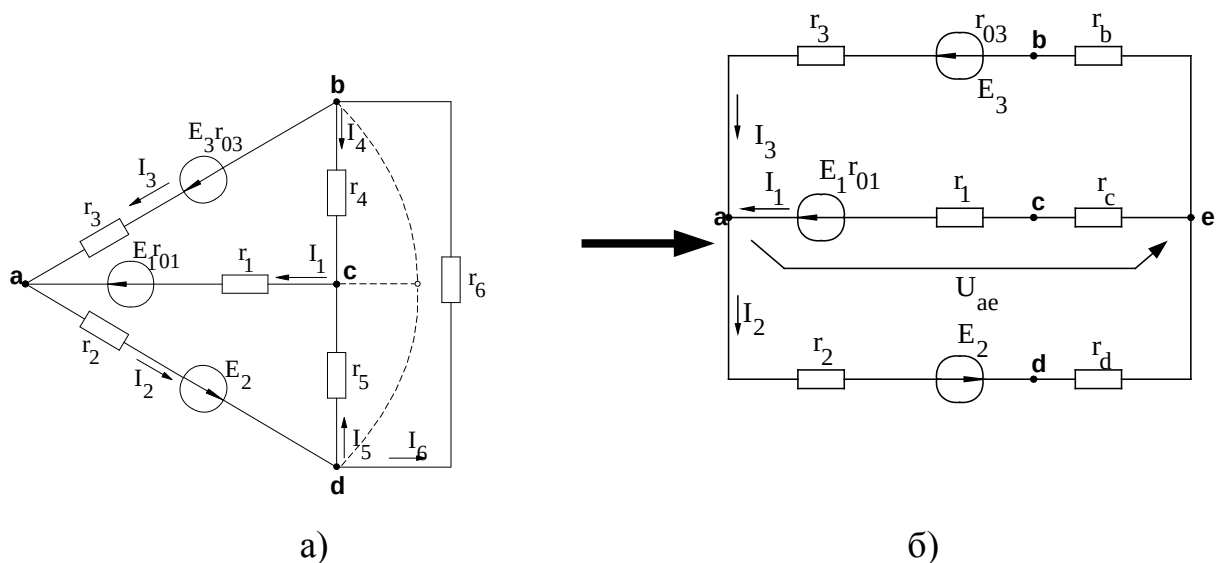


Рис. 1.5. Замещение исходной схемы эквивалентной

Сопrotивление лучей эквивалентной звезды определяются из выражения

$$\left. \begin{aligned} r_b &= \frac{r_4 \cdot r_6}{r_4 + r_5 + r_6}; \\ r_c &= \frac{r_4 \cdot r_5}{r_4 + r_5 + r_6}; \\ r_d &= \frac{r_5 \cdot r_6}{r_4 + r_5 + r_6}. \end{aligned} \right\}$$

$$r_b = \frac{r_4 \cdot r_6}{r_4 + r_5 + r_6} = \frac{3 \cdot 4}{3 \cdot 8 \cdot 4} = \frac{12}{15} = 0,8 \text{ Ом};$$

$$r_c = \frac{r_4 \cdot r_5}{r_4 + r_5 + r_6} = \frac{3 \cdot 8}{3 \cdot 8 \cdot 4} = \frac{24}{15} = 1,6 \text{ Ом};$$

$$r_d = \frac{r_5 \cdot r_6}{r_4 + r_5 + r_6} = \frac{8 \cdot 4}{3 \cdot 8 \cdot 4} = \frac{32}{15} = 2,133 \text{ Ом}.$$

Схема (рис 1.5. б) имеет два узла и три ветви. Задаёмся произвольным направлением узлового напряжения U_{ae} и находим его величину по формуле

$$U_{ae} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3},$$

где g_1, g_2, g_3 - проводимости ветвей

$$g_1 = \frac{1}{r_1 + r_{01} + r_c} = \frac{1}{1 + 0,1 + 1,6} = 0,3704 \text{ См};$$

$$g_2 = \frac{1}{r_2 + r_d} = \frac{1}{2 + 2,133} = 0,242 \text{ См};$$

$$g_3 = \frac{1}{r_3 + r_{03} + r_b} = \frac{1}{6 + 1,1 + 0,8} = 0,1266 \text{ См}.$$

$$U_{ae} = \frac{20 \cdot 0,3704 - 22 \cdot 0,242 + 9 \cdot 0,1266}{0,3704 + 0,242 + 0,126} = \frac{3,2234}{0,739} = 4,3618 \text{ В}$$

Выберем условные направления токов в ветвях, и в соответствии с законом Ома для активных ветвей, будем иметь

$$I_1 = (E_1 - U_{ae}) g_1 = (20 - 4,3618) \cdot 0,3704 = 5,791 \text{ А};$$

$$I_2 = (E_2 + U_{ae}) g_2 = (22 + 4,3618) \cdot 0,242 = 6,378 \text{ А};$$

$$I_3 = (E_3 - U_{ae})g_3 = (9 - 4,3618) \cdot 0,1266 = 0,587 \text{ A.}$$

Вывод: найденные токи совпадают по величине и направлению с аналогичными величинами токов, найденных методом контурных токов.

4) определяем ток в резисторе r_6 методом эквивалентного генератора

Ток в рассматриваемой ветви определяем по формуле

$$I_6 = \frac{U_{xx}}{r_{ex} + r_6}.$$

Для определения тока в резисторе r_6 размыкаем ветвь с данным резистором и находим напряжение холостого хода на зажимах разомкнутой ветви (рис. 1.6). Для определения токов воспользуемся методом контурных токов

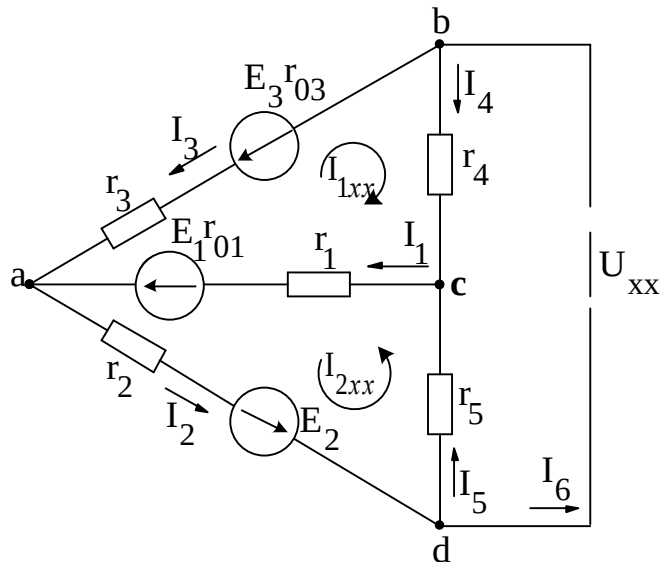


Рис.1.6. Схема при холостом ходе

а) находим напряжение холостого хода: $U_{xx} = I_5 r_5 - I_4 r_4$.

Для определения токов I_4 и I_5 составляем уравнения по второму закону Кирхгофа $I_4 = I_{1xx}$; $I_5 = I_{2xx}$.

$$\left. \begin{aligned} I_{1xx} (r_1 + r_{01} + r_3 + r_{03} + r_4) + I_{2xx} (r_1 + r_{01}) &= E_1 - E_3; \\ I_{1xx} (r_1 + r_{01}) + I_{2xx} (r_1 + r_{01} + r_2 + r_5) &= E_1 + E_2. \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} I_{1xx} \cdot 11,2 + I_{2xx} \cdot 1,1 &= 11 \\ I_{1xx} \cdot 1,1 + I_{2xx} \cdot 11,1 &= 42 \end{aligned} \right\}$$

Решаем систему уравнений методом определителей.

Главный определитель

$$\Delta = \begin{vmatrix} 11,2 & 1,1 \\ 1,1 & 11,1 \end{vmatrix} = (11,2 \cdot 11,1) - (1,1 \cdot 1,1) = 123,11.$$

Частные определители

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 11 & 1,1 \\ 42 & 11,1 \end{vmatrix} = (11 \cdot 11,1) - (42 \cdot 1,1) = 75,9;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 11,2 & 11 \\ 1,1 & 42 \end{vmatrix} = (11,2 \cdot 42) - (1,1 \cdot 11) = 458,3.$$

Контурные токи равны:

$$I_{1xx} = I_4 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{75,9}{123,11} = 0,617 A;$$

$$I_{2xx} = I_5 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{458,3}{123,11} = 3,723 A.$$

Напряжение х.х.

$$U_{xx} = I_5 r_5 - I_4 r_4 = 3,723 \cdot 8 - 0,617 \cdot 3 = 27,933 B.$$

Таким образом, э.д.с. эквивалентного генератора $E_{\text{экв}} = 27,933 B$.

б) для определения входного сопротивления схемы по отношению разомкнутых зажимов заворачиваем источники питания (рис 1.7, а).

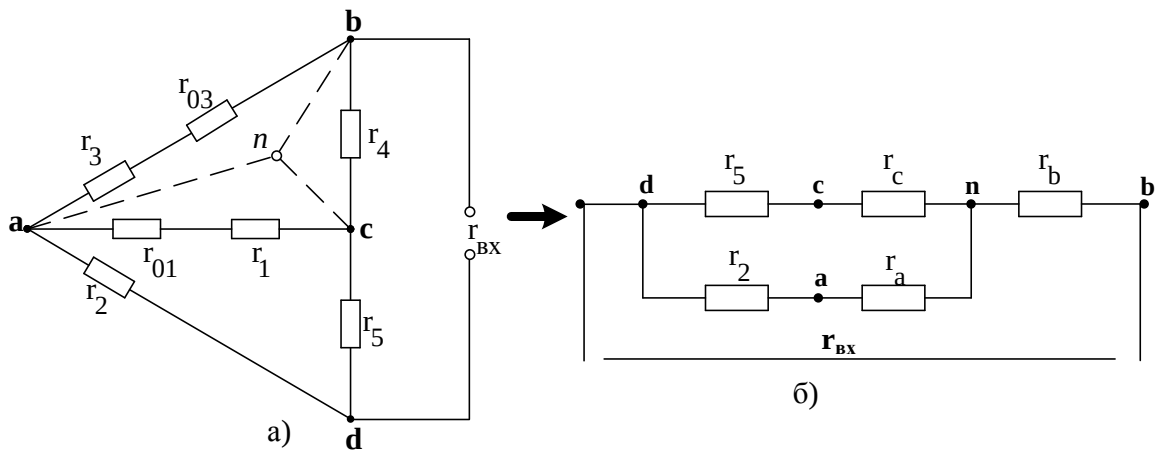


Рис.1.7 Схема при коротком замыкании

Заменяем треугольник сопротивлений « r_1, r_3, r_4 » на эквивалентную звезду « r_a, r_b, r_c » (рис 1.7, б).

Сопротивления лучей эквивалентной звезды равны

$$r_a = \frac{(r_3 + r_{03}) \cdot (r_1 + r_{01})}{r_1 + r_{01} + r_3 + r_{03} + r_4} = \frac{(6+1,1) \cdot (1+0,1)}{1+0,1+6+1,1+3} = \frac{7,81}{11,2} = 0,697 \text{ Ом};$$

$$r_b = \frac{(r_3 + r_{03}) \cdot r_4}{r_1 + r_{01} + r_3 + r_{03} + r_4} = \frac{(6+1,1) \cdot 3}{1+0,1+6+1,1+3} = \frac{21,3}{11,2} = 1,902 \text{ Ом};$$

$$r_c = \frac{(r_1 + r_{01}) \cdot r_4}{r_1 + r_{01} + r_3 + r_{03} + r_4} = \frac{(1+0,1) \cdot 3}{1+0,1+6+1,1+3} = \frac{3,3}{11,2} = 0,295 \text{ Ом}.$$

Входное сопротивление относительно зажимов «bd» равно

$$\begin{aligned} r_{ex} &= r_b + \frac{(r_5 + r_c) \cdot (r_2 + r_a)}{r_5 + r_c + r_2 + r_a} = 1,902 + \frac{(8+0,295) \cdot (2+0,697)}{8+0,295+2+0,697} = \\ &= 1,902 + \frac{22,372}{10,992} = 1,902 + 2,035 = 3,937 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Ток в резисторе r_6 будет

$$I_6 = \frac{U_{xx}}{r_{ex} + r_6} = \frac{27,933}{3,937 + 4} = \frac{27,933}{7,937} = 3,519 \text{ А}.$$

5) определяем показания вольтметра и составляем баланс мощностей

а) для определения показания вольтметра составляем уравнение по второму закону Кирхгофа (рис 1.4)

$$U_V = I_1 r_1 + I_4 r_4 = 1 \cdot 5,791 + 3 \cdot 2,932 = 14,587 \text{ В}.$$

б) определяем баланс мощностей $\sum_{n=1}^i P_{ист} = \sum_{n=1}^i P_{потр}$ или $\sum_{\kappa=1}^n E_{\kappa} I_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^m r_{\kappa} I_{\kappa}^2$

$$\sum_{\kappa=1}^n E_{\kappa} I_{\kappa} = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 = 20 \cdot 5,791 + 22 \cdot 6,378 + 9 \cdot 0,587 = 261,4 \text{ Вт}$$

$$\begin{aligned} \sum_{\kappa=1}^m r_{\kappa} I_{\kappa}^2 &= (r_1 + r_{01}) I_1^2 + r_2 I_2^2 + (r_3 + r_{03}) I_3^2 + r_4 I_4^2 + r_5 I_5^2 + r_6 I_6^2 = \\ &= (1+0,1) \cdot 5,791^2 + 2 \cdot 6,378^2 + (6+1,1) \cdot 0,578^2 + 3 \cdot 2,932^2 + \\ &+ 8 \cdot 2,859^2 + 4 \cdot 3,519^2 = 261,4 \text{ Вт} \end{aligned}$$

$$261,4 \text{ Вт} = 261,4 \text{ Вт}.$$

6) построение потенциальной диаграммы для внешнего контура

Потенциальная диаграмма представляет собой график изменения потенциала при обходе цепи по замкнутому контуру, построенной в прямоугольной системе координат. (рис. 1.8)

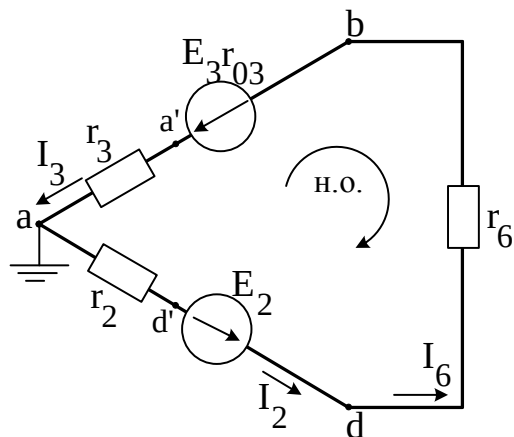


Рис.1.8. Внешний контур электрической цепи

Принимаем потенциал точки $V_a = 0B$, тогда

$$V_{a'} = V_a - r_3 I_3 = 0 - 6 \cdot 0,587 = -3,522B,$$

$$V_b = V_{a'} - r_{03} I_3 + E_3 = -3,522 - 1,1 \cdot 0,587 + 9 = 4,832B,$$

$$V_d = V_b - r_6 I_6 = 4,832 - 4 \cdot 3,519 = -9,243B,$$

$$V_{d'} = V_d + E_2 = -9,243 + 22 = 12,756B,$$

$$V_a = V_{d'} - r_2 I_2 = 12,756 - 2 \cdot 6,378 = 0B.$$

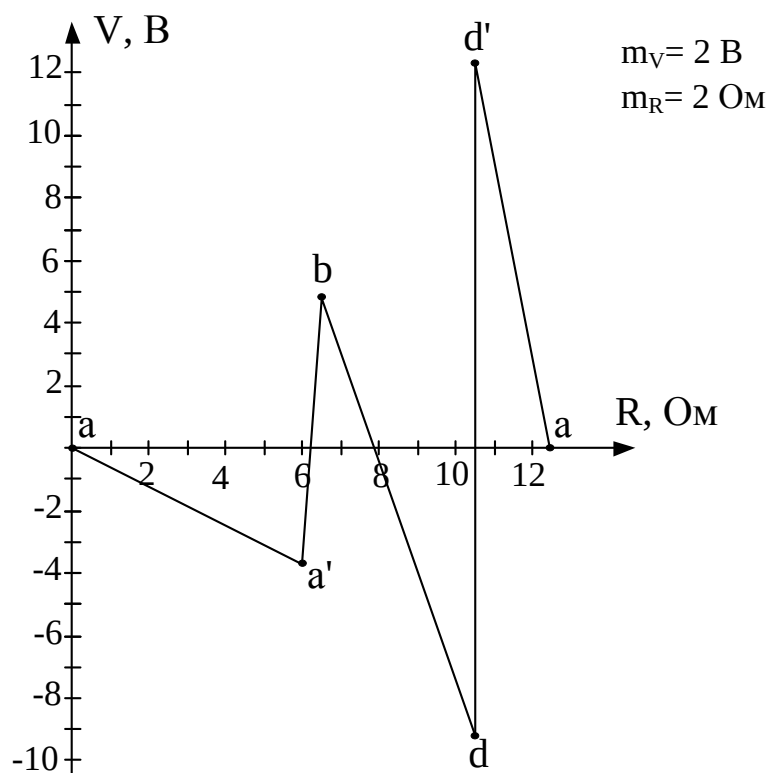


Рис.1.9. Потенциальная диаграмма

ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 1.1

Вольтметр в электрической цепи, изображенной на рисунке 1.10, показывает, напряжение U , сопротивление схемы и ЭДС E_2 известны. Найти токи во всех ветвях схемы и ЭДС E_1 . Составить баланс мощностей. Построить потенциальную диаграмму.

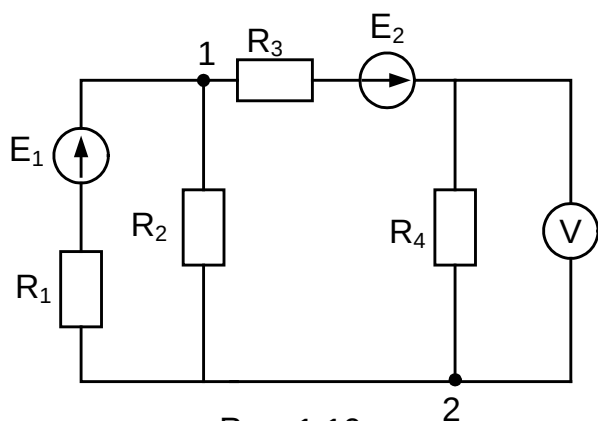


Рис. 1.10.

Таблица 1.1

Варианты	Данные к задаче №1.1					
	U, В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	E ₂ , В
1	8	1	3	4	4	6
2	5	3	8	2	5	3
3	15	5	11	11	3	2
4	10	2	11	2	5	5
5	20	6	12	4	4	5
6	25	8	2	3	5	20
7	5	2	5	2	1	30
8	10	3	5	8	2	12
9	12	8	3	5	3	15
10	24	3	5	3	6	25
11	18	12	8	6	4	12
12	30	18	14	25	8	20
13	8	12	16	18	9	6
14	6	8	8	12	16	8
15	24	18	25	14	12	30
16	16	28	14	12	26	24
17	35	14	18	12	8	40
18	5	12	9	14	8	4
19	24	9	8	6	5	18
20	30	8	8	15	12	20

Задача 1.2

В электрической цепи, изображенной на рисунке 1.11, известны пока-

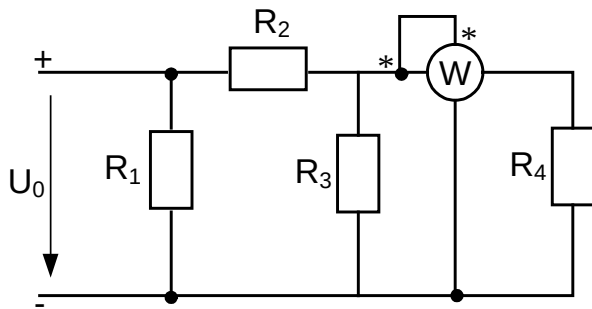


Рис. 1.11.

зания ваттметра P , а также сопротивления резисторов. Рассчитать токи во всех ветвях цепи и напряжения на резисторах, а также U_0 . Составить баланс мощностей. Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура.

Таблица 1.2

Варианты	Данные к задаче 1.2				
	P , Вт	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом
1	75	2	6	3	3
2	80	10	15	10	20
3	45	8	16	3	5
4	144	3	12	2	4
5	15	8	10	5	15
6	24	2	2	4	6
7	72	10	20	2	8
8	250	3	15	5	10
9	48	2	10	2	3
10	16	10	36	8	4
11	24	8	12	5	6
12	95	15	18	12	14
13	28	10	22	35	16
14	120	80	40	25	30
15	80	15	35	18	8
16	55	30	18	24	16
17	34	8	6	14	12
18	22	14	18	9	15
19	40	8	12	12	8
20	25	18	9	15	9

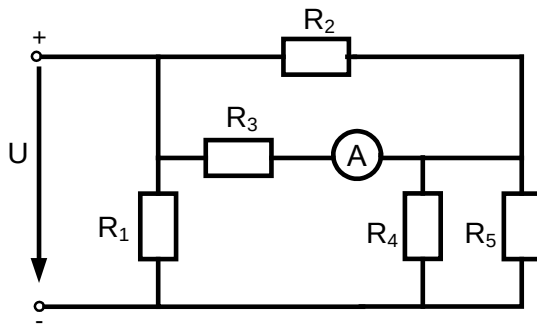
Задача 1.3

Рис. 1.12.

В электрической цепи, изображенной на рисунке 1.12, известны сопротивления резисторов и сила тока I , протекающего через амперметр. Рассчитать токи, протекающие через резисторы, и напряжение U на зажимах схемы.

Таблица 1.3

Варианты	Данные к задаче 1.3					
	I, A	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$
1	2	3	5	4	8	15
2	5	8	15	12	6	3
3	12	14	11	6	4	8
4	10	6	10	12	8	5
5	4	9	14	18	6	12
6	14	11	7	13	9	10
7	1	6	12	17	13	4
8	18	9	3	11	30	25
9	3	22	10	42	18	30
10	2	10	8	6	14	18
11	8	4	9	13	16	4
12	5	8	11	23	7	6
13	2	28	34	56	64	11
14	4	11	16	8	33	15
15	12	45	30	58	65	14
16	3	28	9	7	16	24
17	5	10	3	5	8	13
18	9	14	18	9	22	18
19	3	60	85	33	9	24
20	12	10	7	14	3	8

Задача 1.4

В мостовой схеме (рис. 1.13) известны значения сопротивлений и напряжение на одной диагонали моста. Найти токи, протекающие через все резисторы. Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура.

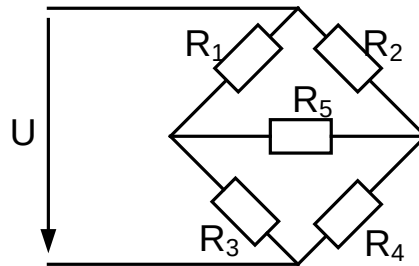


Рис. 1.13

Таблица 1.4

Варианты	Данные к задаче 1.4					
	U, В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом
1	10	15	5	30	12	50
2	40	10	20	20	10	10
3	50	50	30	100	50	200
4	100	5	8	4	10	30
5	20	8	6	5	12	45
6	50	18	30	16	48	100
7	35	40	17	34	45	20
8	44	16	50	30	22	80
9	5	34	7	15	9	15
10	8	4	5	8	20	30
11	15	9	6	6	8	2
12	8	13	19	22	41	16
13	50	5	11	18	12	8
14	65	13	24	14	15	9
15	40	25	8	16	34	40
16	80	13	5	8	9	12
17	10	33	7	18	8	40
18	30	6	13	16	34	50
19	45	18	11	22	9	11

20	75	34	30	18	10	5
----	----	----	----	----	----	---

Задача 1.5

В мостовой схеме (рис. 1.14) найти токи через все резисторы для случаев:

а) $R_5 = 0 \text{ Ом}$;
б) $R_5 = 5 \text{ Ом}$.

Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура.

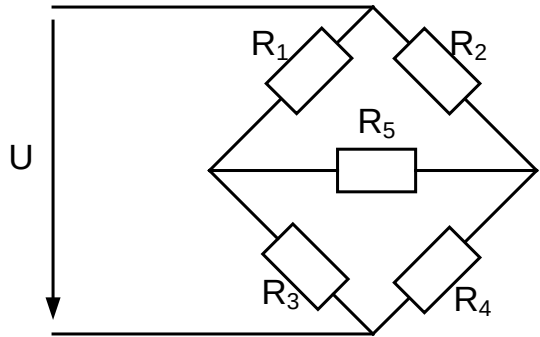


Рис. 1.14.

Таблица 1.5

Варианты	Данные к задаче 1.5				
	U, В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом
1	10	5	3	3	5
2	5	4	5	2	1
3	20	2	3	5	10
4	15	10	2	1	5
5	5	4	6	2	1
6	8	2	8	4	4
7	3	1	2	2	1
8	8	8	8	10	6
9	18	5	4	3	15
10	24	6	6	4	8
11	40	18	12	6	20
12	30	20	10	5	9
13	8	9	6	10	4
14	6	8	15	12	9
15	8	16	22	28	16
16	25	28	35	42	26
17	80	36	28	44	65
18	14	38	53	88	82
19	50	35	12	34	18
20	12	24	32	18	9

Задача 1.6

В схеме (рис. 1.15) известны значения сопротивлений и ЭДС источника. Найти токи во всех ветвях цепи. Составить баланс мощностей. Построить потенциальную диаграмму.

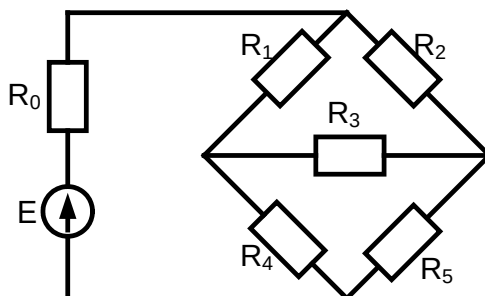


Рис. 1.15.

Таблица 1.6

Вариант	Данные к задаче 1.6						
	E, В	R ₀ , Ом	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом
1	20	1	2	3	1	8	5
2	150	25	30	50	10	10	10
3	10	1	2	1	3	1	2
4	50	1	1	3	2	3	2
5	40	10	20	20	10	5	10
6	30	5	10	20	2	5	10
7	80	5	10	5	15	10	10
8	10	2	1	3	1	2	2
9	25	5	5	8	8	3	2
10	50	5	10	8	5	20	30
11	70	35	17	60	38	42	12
12	15	8	14	22	11	10	7
13	75	35	28	14	32	9	18
14	38	35	48	32	18	24	18
15	90	45	38	34	16	42	34
16	10	30	20	30	15	40	25
17	14	33	28	40	15	16	18
18	24	38	30	18	15	9	12
19	60	3	5	3	4	4	8
20	20	15	18	20	28	30	20

Задача 1.7

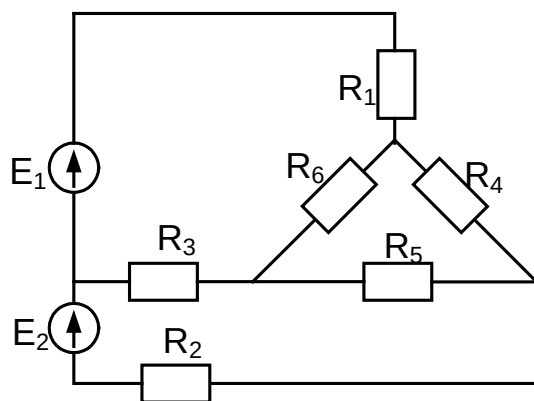


Рисунок 1.16.

В схеме (рис. 1.16), известны значения сопротивлений и ЭДС источников. Найти токи, протекающие через источники, применяя метод эквивалентных преобразований. Составить баланс мощностей. Построить потенциальную диаграмму.

Таблица 1.7

Вариант	Данные к задаче 1.7							
	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$
1	10	12	2	3	8	5	4	3
2	25	30	4	6	5	9	12	8
3	14	22	8	15	9	8	13	9
4	20	30	15	7	3	6	14	18
5	35	60	44	18	30	8	16	50
6	50	25	16	22	40	7	3	25
7	20	40	28	36	11	9	15	8
8	60	15	33	10	20	7	5	15
9	35	18	28	8	16	36	40	10
10	28	45	28	16	11	18	34	5
11	80	60	45	13	65	18	44	9
12	32	8	16	25	11	7	28	14
13	12	30	25	13	14	5	18	30
14	6	15	13	6	3	8	18	2
15	9	22	7	18	3	24	15	29
16	25	40	16	6	4	5	24	35
17	34	8	22	44	15	4	11	40

18	56	18	6	9	28	16	33	54
19	5	15	24	7	4	2	40	6
20	8	22	16	4	28	13	23	19

Задача 1.8

В электрической цепи, изображенной на рисунке 1.17, известны значения сопротивлений схемы и ЭДС. Найти токи во всех ветвях схемы. Составить баланс мощности.

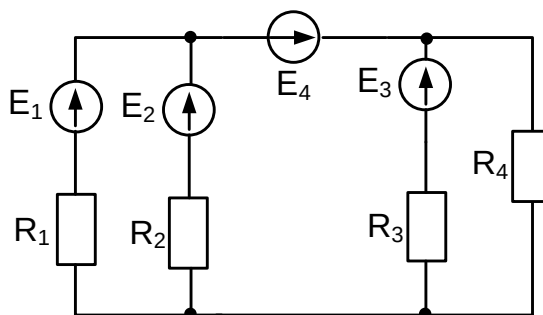


Рис. 1.17.

Таблица 1.8

Вариант	Данные к задаче 1.8							
	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$E_3, \text{В}$	$E_4, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$
1	25	30	15	5	3	2	5	2
2	15	20	10	10	2	5	8	1
3	40	30	10	20	10	20	15	40
4	5	5	10	1	3	1	2	8
5	8	15	5	2	10	5	29	20
6	20	15	10	8	15	20	10	40
7	100	120	150	20	10	15	10	50
8	30	25	18	10	3	2	5	20
9	40	50	30	5	3	4	5	10
10	20	25	25	40	3	2	2	4
11	10	18	10	15	8	6	5	3
12	80	30	60	20	18	35	48	60
13	28	45	30	55	60	70	90	50
14	45	18	36	24	16	16	34	44
15	22	35	16	22	8	12	14	6
16	15	28	24	12	12	8	36	45
17	80	60	70	40	45	25	28	36

18	45	27	38	55	16	14	38	24
19	12	18	8	20	45	32	54	28
20	30	20	9	18	13	34	42	60

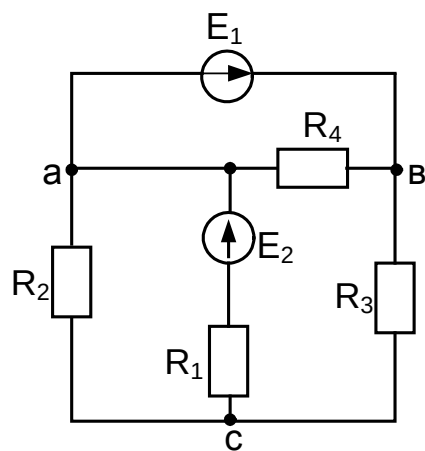
Задача 1.9

Рис. 1.18.

В электрической цепи, изображенной на рисунке 1.18, имеются источники напряжения E_1 и E_2 . Найти токи во всех ветвях схемы и напряжения между узлами a, b , и a, c .

Таблица 1.9

Вариант	Данные к задаче 1.9					
	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$
1	5	9	3	7	16	12
2	2	10	5	2	10	6
3	10	15	2	8	6	4
4	4	13	4	12	18	10
5	12	30	10	10	4	3
6	6	40	5	3	1	7
7	3	25	4	7	12	3
8	44	16	50	30	22	80
9	12	65	3	11	8	6
10	4	18	6	12	3	4
11	6	24	2	6	7	3
12	11	75	4	3	12	5
13	10	80	10	11	5	9
14	8	90	6	7	5	14
15	12	100	10	6	11	19
16	7	9	1	3	2	5
17	1	10	6	3	4	10
18	4	28	3	8	2	1
19	13	120	7	11	14	5

20	6	60	4	20	12	4
----	---	----	---	----	----	---

Задача 1.10

В электрической цепи, изображенной на рисунке 1.19, имеются два источника E , заданы сопротивления. Найти токи во всех ветвях схемы. Построить потенциальную диаграмму для внешнего контура.

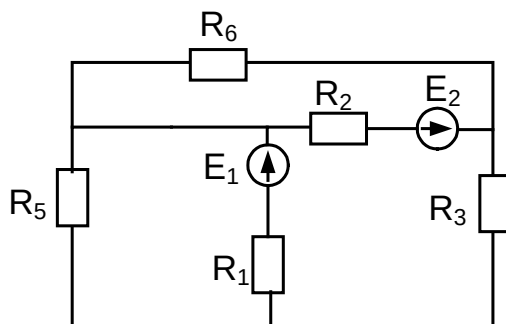


Рис. 1.19.

Таблица 1.10

Вариант	Данные к задаче 1.10							
	$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_4, \text{Ом}$	$R_5, \text{Ом}$	$R_6, \text{Ом}$
1	18	10	8	6	5	4	2	10
2	6	12	4	8	3	6	5	2
3	34	18	3	6	2	4	1	3
4	8	12	3	4	3	1	8	6
5	17	34	5	10	6	5	4	3
6	50	30	6	9	6	7	1	2
7	10	9	5	2	4	3	8	3
8	25	8	3	1	6	2	1	9
9	80	40	8	4	5	12	30	12
10	16	22	7	10	6	8	4	10
11	25	32	5	6	3	2	5	3
12	40	60	4	6	5	12	10	4
13	9	12	8	8	5	3	4	9
14	8	6	1	2	5	2	1	3
15	7	15	2	3	4	3	8	7
16	34	18	5	9	6	8	12	10

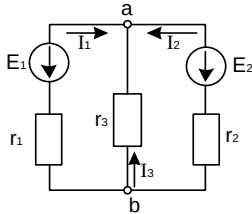
17	45	30	10	3	10	1	2	12
18	9	32	1	2	6	4	1	4
19	56	80	12	9	7	14	11	8
20	38	50	2	3	9	6	7	6

Тестовые задания для самоконтроля

Тема: Цепи постоянного тока

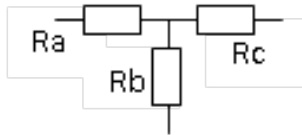
Тест 1.1

№1. Определить напряжение между узлами «а» и «b» U_{ba} , если дано $E_2=24\text{В}$; $I_2=6\text{А}$; $r=1\text{ Ом}$.



1. 18 В;
2. 24 В;
3. 30 В;
4. Для решения задачи недостаточно данных.

№2. Для представленного рисунка найти сопротивления эквивалентного треугольника, если $R_a = R_b = R_c = 9\text{ Ом}$.



1. $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = 3\text{ Ом}$;
2. $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = 27\text{ Ом}$;
3. $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca} = 9\text{ Ом}$.

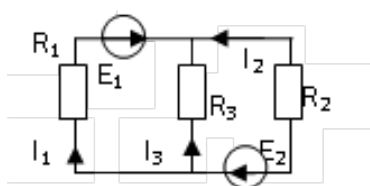
№3. Элементы, в которых химическая, тепловая, механическая энергия или энергия других видов превращается в электрическую – это.....

1. Приемник;
2. Источник;
3. Резистор.

№4. Назовите единицу измерения электрического напряжения

1. Вольт;
2. Ампер;
3. Ом;
4. Ватт

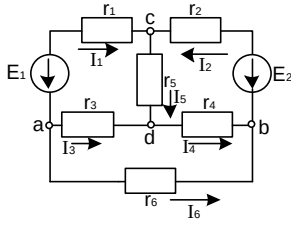
№5. Какие из величин I_1 , I_2 , I_3 , E_1 и E_2 войдут в уравнение 2-го закона Кирхгофа со знаком минус?



1. E_1 , I_1 ;
2. E_2 , I_2 ;
3. Зависит от выбора направления обхода контура электрической цепи.

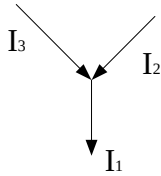
Тест 1.2

№1. Для исходной схемы определить: а) сколько независимых контуров в цепи? б) сколько уравнений по второму закону Кирхгофа нужно составить для расчета этой цепи?



1. а) 7; б) 3;
2. а) 3; б) 3;
3. а) 3; б) 4;
4. а) 4; б) 7.

№2. Для приведенного рисунка определить значение второго тока по первому закону Кирхгофа, если $I_1 = 5\text{ A}$, $I_3 = 3\text{ A}$.

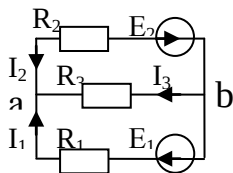


1. -8 A;
2. 2 A;
3. 8 A;
4. - 2A.

№3. Элементы, в которых электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии – это.....

1. Приемник;
2. Источник;
3. Емкость.

№4. Выберите правильную формулу для определения тока во второй ветви этой схеме



1. $I_2 = (E_2 - U_{ab}) \cdot G_2$;
2. $I_2 = (-E_2 - U_{ab}) \cdot G_2$;
3. $I_2 = (E_2 + U_{ab}) \cdot G_2$

№5. Назовите единицу измерения электрического сопротивления.

1. Вольт;
2. Ампер;
3. Ом;
4. Ватт;
5. Сименс.

2 Переменный электрический ток

Переменный электрический ток (ЭДС, напряжение) – это ток (ЭДС, напряжение), изменяющийся с течением времени. Значение этой величины в рассматриваемый момент времени называется мгновенным значением тока (ЭДС, напряжение).

Наибольшее распространение получил переменный синусоидальный ток (ЭДС, напряжение), являющийся синусоидальной функцией времени. Переменный синусоидальный сигнал характеризуется периодом T , выражаемым в секундах (с), или величиной, обратной периоду и называемой частотой электрического тока (ЭДС, напряжение) f , выражаемой в герцах (Гц):

$$f = \frac{1}{T}, \quad (2.1)$$

где T – период, с.

Период – это время одного полного колебания синусоидальной величины.

Мгновенные значения тока, ЭДС, напряжение будут иметь вид

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin(\omega t \pm \psi_i), \\ e &= E_m \sin(\omega t \pm \psi_e), \\ u &= U_m \sin(\omega t \pm \psi_u), \end{aligned} \quad (2.2)$$

где i, e, u - мгновенные значения тока, А, ЭДС, В и напряжения, В;

I_m, E_m, U_m - амплитудные значения тока, А, ЭДС, В и напряжения, В;

$\dots(\omega t \pm \psi_u), (\omega t \pm \psi_i), (\omega t \pm \psi_e)$ - фаза;

ω - угловая частота, с⁻¹;

ψ_i, ψ_e, ψ_u - начальная фаза тока, ЭДС и напряжения, градус;

t - время, с.

Амплитудными значениями или максимальными называются наибольшие значения периодически изменяющихся токов, напряжений или ЭДС.

Фаза – это аргумент синусоидальной функции, который характеризует значение синусоидальной величины в момент времени t .

Угловая частота синусоидального электрического тока (ЭДС, напряжения)

$$\omega = 2\pi f . \quad (2.3)$$

Начальная фаза тока (ЭДС, напряжения) (ψ_i, ψ_e, ψ_u) – это значение фазы в момент времени $t=0$.

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин одной и той же частоты называют **сдвигом фаз**.

Сдвиг фаз между напряжением и током определяется вычитанием начальной фазы напряжения из начальной фазы тока:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i \quad (2.4)$$

Синусоидально изменяющиеся величины изображают либо графически как функция времени t или угла ωt (рис 2.1), либо вращающимися векторами на плоскости. В последнем случае длина вектора в выбранном масштабе представляет собой амплитудное или действующее значение этой величины, угол между этим вектором и положительным направлением оси абсцисс в начальный момент времени равен начальной фазе ψ , а угловая частота вращения вектора равна угловой частоте ω (рис 2.2).

Действующее значение переменного тока (ЭДС, напряжения) – это среднеквадратическое значение переменного тока (ЭДС, напряжения) за период T

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} . \quad (2.5)$$

Если ток, ЭДС или напряжение изменяются по синусоидальному закону, то его действующее значение составляет 0,707 амплитудного значения:

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot I_m , \\ E &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot E_m , \\ U &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 \cdot U_m \end{aligned} \quad (2.6)$$

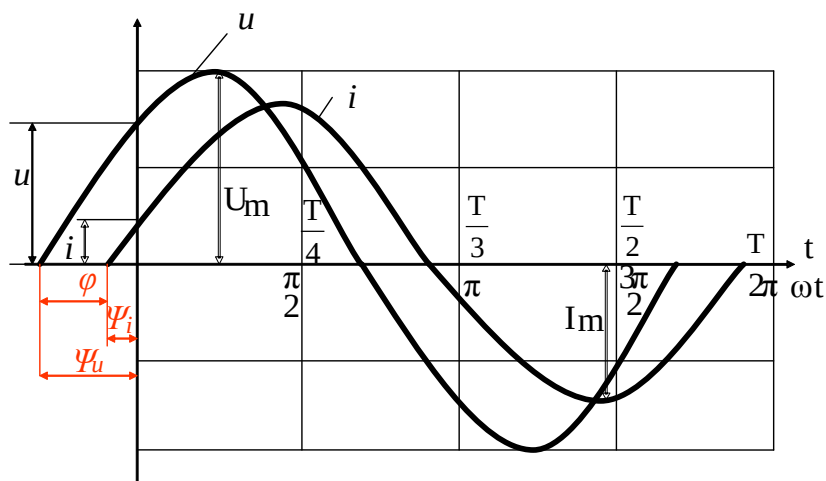


Рис.2.1. Изображение синусоидальных величин в функции времени

Способы представления синусоидальных величин:

1. Тригонометрическая форма записи (2.3);
2. Графическая (временная диаграмма) (рис 2.1);
3. Векторные диаграммы;
4. Комплексные числа.

Метод представления комплексными числами

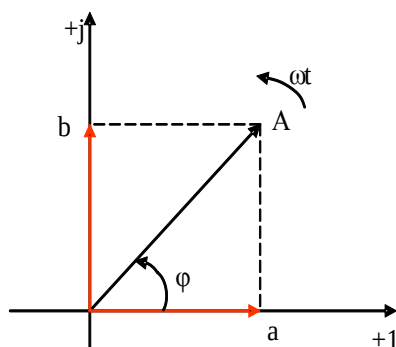


Рис.2.2. Изображение синусоидальных величин вращающимися векторами на плоскости

Из курса математики известно, что любое комплексное число $\dot{A}$ можно представить

а) в алгебраической форме

$$\dot{A} = a + jb; \quad (2.7)$$

б) в тригонометрической форме

$$\dot{A} = A(\cos \varphi + j \sin \varphi); \quad (2.8)$$

в) в показательной форме

$$\dot{A} = A e^{j\varphi}; \quad (2.9)$$

г) вектором на комплексной плоскости (рис 2.2),

где $j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица;

$a = A \cdot \cos \varphi$ - реальная часть комплексного числа $\dot{A}$ (проекция вектора на ось абсцисс – вещественная ось);

$b = A \cdot \sin \varphi$ - мнимая часть комплексного числа $\dot{A}$ (проекция вектора на ось ординат – мнимая ось);

$A = |\dot{A}| = \sqrt{a^2 + b^2}$ - модуль комплексного числа;

$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$ - множитель, называется формулой Эйлера;

$\varphi = \arctg \frac{b}{a}$ - значение аргумента комплексного числа.

2.1 Однофазные электрические цепи

2.1.1 Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Если цепь обладает только активным сопротивлением R (цепь с резистором) и к ее зажимам приложено синусоидальное напряжение (рис. 2.3)

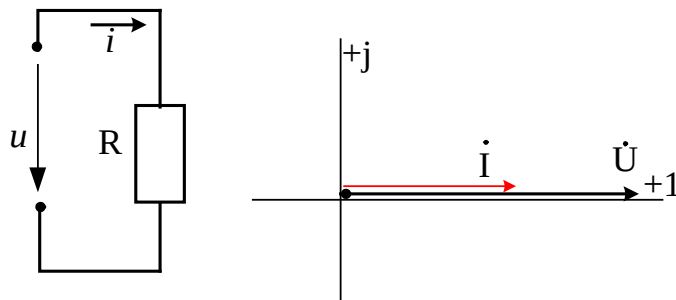


Рис.2.3. Цепь переменного тока с активным сопротивлением

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (2.10)$$

то по закону Ома мгновенное значение тока в цепи

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad (2.11)$$

где U_m - амплитудное значение напряжения, В;

$$I_m = \frac{U_m}{R} \text{ - амплитудное значение тока, А.}$$

Действующее значение тока в цепи

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.12)$$

Напряжение и ток в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе ($\varphi=0$ по формуле 2.4), и в любой момент времени мгновенные значения тока и напряжения пропорциональны друг другу.

Активная мощность электрической цепи выражается в ватах (Вт)

$$P = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (2.13)$$

2.1.2 Цепь переменного тока с индуктивностью

Если электрическая цепь обладает только индуктивностью L (активное сопротивление катушки $R=0$) и по ней проходит синусоидальный ток (рис. 2.4)

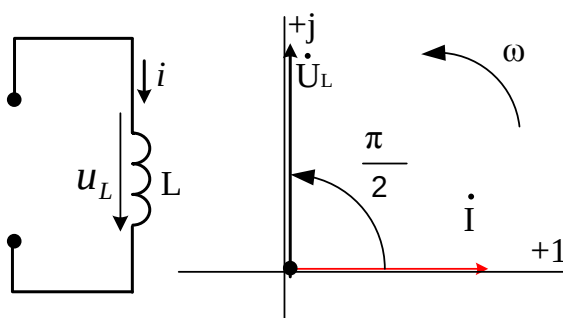


Рис.2.4. Цепь переменного тока с индуктивным сопротивлением

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (2.14)$$

то по второму закону Кирхгофа

$$u_L = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.15)$$

Следовательно, при синусоидальном токе напряжение на индуктивности по фазе опережает ток на угол $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Векторная диаграмма этой цепи представлена на рисунке 2.4. По закону Ома

$$i = \frac{u}{(\omega L)} = \frac{u}{x_L}, \quad (2.16)$$

где $x_L = \omega \cdot L = 2\pi fL$ - индуктивное сопротивление, Ом;

L – индуктивность, Гн.

Цепь с индуктивностью обладает только реактивной мощностью, которая называется индуктивной, измеряемая в вольт-амперах реактивных (вар),

$$Q_L = U_L \cdot I = I^2 x_L. \quad (2.17)$$

2.1.3 Цепь переменного тока с конденсатором

Если электрическая цепь обладает только емкостью (конденсатор без потерь) и к ней приложено напряжение u переменного тока, то в цепи проходит ток (рис. 2.5)

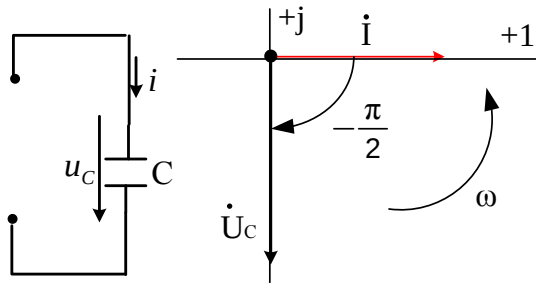


Рис.2.3. Цепь переменного тока с емкостью

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (2.18)$$

$$u_C = U_{Cm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.19)$$

Амплитудное значение тока в цепи

$$I_m = \frac{U_m}{x_C}, \quad (2.20)$$

где C – емкость конденсатора, мкФ;

$$x_c = \frac{1}{(\omega C)} - \text{емкостное сопротивление, Ом.}$$

Цепь обладает реактивной мощностью, которая называется емкостной, измеряемая в вольт-амперах реактивных (вар),

$$Q_C = U_C \cdot I = I^2 \cdot X_C. \quad (2.21)$$

ПРИМЕР 2.

Дано:

$E = 80 \text{ В}$; $f = 50 \text{ Гц}$; $C_1 = 280 \text{ мкФ}$; $L_2 = 15,7 \text{ мГн}$; $L_3 = 6,5 \text{ мГн}$; $r_1 = 4 \text{ Ом}$;
 $r_2 = 2 \text{ Ом}$; $r_3 = 3 \text{ Ом}$.

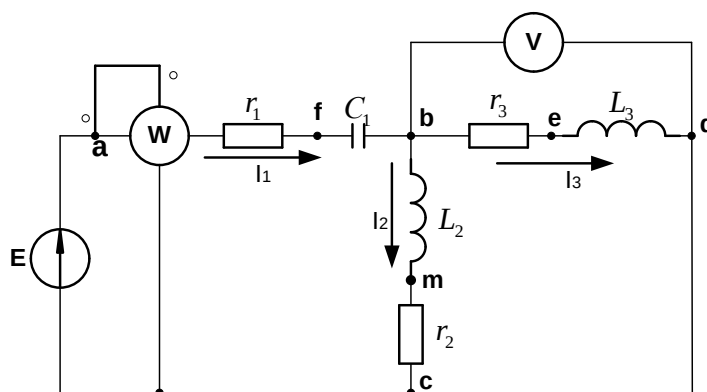


Рис. 2.6. Исходная схема

Найти: 1. Определить токи во всех ветвях цепей и напряжения на отдельных участках цепи.

2. Найти комплексы действующих значений токов во всех ветвях и их мгновенные значения;

3. Составить баланс мощностей (активной, реактивной, полной).

4. Построить в масштабе на комплексной плоскости топографическую диаграмму напряжений для замкнутых контуров, совмещённую с векторной диаграммой токов.

5. Определить показания вольтметра и ваттметра.

6. Построить графики мгновенных значений тока и напряжения, проходящие в ваттметре.

Решение:**1) находим сопротивления реактивных элементов цепи**

Емкостное сопротивление

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 280 \cdot 10^{-6}} = 11,37 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление

$$X_{L2} = \omega L_2 = 2\pi f L_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 15,7 \cdot 10^{-3} = 4,93 \text{ Ом};$$

$$X_{L3} = \omega L_3 = 2\pi f L_3 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} = 2,04 \text{ Ом}.$$

2) расчёт токов в ветвях электрической цепи

Задаёмся направлением токов в ветвях цепи. Записываем электрические сопротивления ветвей цепи в комплексной форме (рис. 2.6)

$$\underline{Z}_1 = r_1 - jX_{C1} = 4 - j11,37 = 12,05e^{-j71} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = r_2 + jX_{L2} = 2 + j4,93 = 5,32e^{j68} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = r_3 + jX_{L3} = 3 + j2,04 = 3,63e^{j34} \text{ Ом}.$$

Определяем по формулам модуль и аргумент комплексного сопротивления ветвей цепи

$$Z = \sqrt{r^2 + X^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{X}{r}.$$

$$Z_1 = 12,05 \text{ Ом}; \quad Z_2 = 5,32 \text{ Ом}; \quad Z_3 = 3,63 \text{ Ом}.$$

$$\varphi_1 = -71^\circ; \quad \varphi_2 = 68^\circ; \quad \varphi_3 = 34^\circ.$$

Электрическую схему заменяем эквивалентной с изображением ветвей полными электрическими сопротивлениями в комплексной форме (рис.2.7).

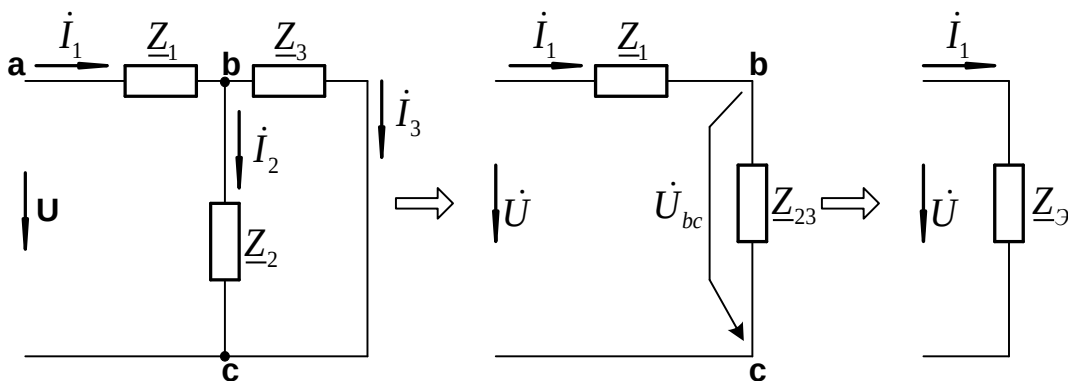


Рис. 2.7. Эквивалентная схема замещения

Путём эквивалентных преобразований схему упрощаем до схемы с одним сопротивлением $\underline{Z}_9$, для этого два параллельных сопротивления $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$ заменяем эквивалентным $\underline{Z}_{23}$:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{23} &= \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{5,32e^{j68} \cdot 3,63e^{j34}}{2 + j4,93 + 3 + j2,04} = \frac{19,31e^{j102}}{5 + j6,97} = \frac{19,31e^{j102}}{8,58e^{j54}} = \\ &= 2,25e^{j48} = (1,51 + j1,67) \text{ Ом}.\end{aligned}$$

Эквивалентное сопротивление всей цепи, как видно из схемы равно

$$\underline{Z}_9 = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = 4 - j11,37 + 1,51 + j1,67 = 5,51 - j9,7 = 11,16e^{-j60} \text{ Ом}.$$

Находим ток на входе цепи по закону Ома

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_9} = \frac{80 \cdot e^{j0}}{11,16 \cdot e^{-j60}} = 7,17 \cdot e^{j60} = (3,59 + j6,21) \text{ А}.$$

Действующее значение тока (модуль)

$$I_1 = \sqrt{3,59^2 + 6,21^2} = 7,17 \text{ А}.$$

Начальная фаза тока

$$\psi_i = \arctg \frac{6,21}{3,59} \approx 60^\circ.$$

Для определения токов $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$ найдём $\dot{U}_{bc}$

а) по закону Ома

$$\dot{U}_{bc} = \underline{Z}_{23} \cdot \dot{I}_1 = 2,25e^{j48} \cdot 7,17e^{j60} = 16,13e^{j108} = (-4,98 + j15,34) \text{ В}.$$

б) по второму закону Кирхгофа

$$\begin{aligned}\dot{U}_{bc} &= \dot{U} - \underline{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 = 80 - 12,05e^{-j71} \cdot 7,17e^{j60} = 80 - 86,4e^{-j11} = \\ &= 80 - 84,98 + j15,34 = (-4,98 + j15,34) = 16,13e^{j108} \text{ В}.\end{aligned}$$

Токи в параллельных ветвях

$$\begin{aligned}\dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_2} = \frac{16,13e^{j108}}{5,32e^{j68}} = 3,03e^{j40} = (2,32 + j1,95) \text{ А}; \\ \dot{I}_3 &= \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_3} = \frac{16,13e^{j108}}{3,63e^{j34}} = 4,44e^{j74} = (1,27 + j4,26) \text{ А}.\end{aligned}$$

Правильность расчёта проверяем по первому и второму законам Кирхгофа:

$$\text{по первому закону Кирхгофа } \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

$$3,59 + j6,21 A = 2,32 + j1,95 + 1,27 + j4,26 = 3,59 + j6,21 A.$$

по второму закону Кирхгофа для контура «abca»

$$\dot{U} = \underline{Z}_1 \dot{I}_1 + \underline{Z}_2 \dot{I}_2.$$

$$80 = 12,05e^{-j71} \cdot 7,17e^{j60} + 5,32e^{j68} \cdot 3,03e^{j40} = 86,4e^{-j11} + 16,12e^{j108} = \\ = 84,98 - j15,34 - 4,98 + j15,34 = 80 B.$$

3) Составим баланс мощностей (активной, реактивной, полной) Баланс мощности заключается в равенстве суммарных мощностей, отдаваемых источником электрической энергии и потребляемых электрофизическими элементами электрической цепи.

$$\sum \underline{S}_{ист.} = \sum \underline{S}_{приёмника},$$

где $\sum \underline{S}_{ист.} = \sum \dot{E}_k \cdot I_k^*$ - сумма комплексных мощностей источников электрической энергии;

$\sum \underline{S}_{приём.} = \sum \underline{Z}_k \cdot \dot{I}_k^2$ - сумма комплексных мощностей электрофизических элементов (потребителя) электрической цепи.

$$\underline{S}_{ист.} = \dot{U} \cdot I_1^* = 80 \cdot 7,17e^{-j60} = 573,6e^{-j60} BA.$$

$$\underline{S}_{приёмника} = \underline{Z}_1 \cdot (I_1)^2 + \underline{Z}_2 \cdot (I_2)^2 + \underline{Z}_3 \cdot (I_3)^2 = \\ = 12,05e^{-j71} \cdot (7,17)^2 + 5,23e^{j68} \cdot (3,03)^2 + 3,63e^{j34} \cdot (4,44)^2 = \\ = 201,7 - j585,8 + 18,3 + j45,3 + 66,8 + j43,7 = \\ = 286,8 - j496,8 = 573,6e^{-j60} BA.$$

Активная мощность $P = 286,8 Bm$

Реактивная мощность $Q = -496,8 var.$

Значение «-» говорит о характере нагрузки.

4) построить в масштабе на комплексной плоскости топографическую диаграмму напряжений для замкнутых контуров, совмещённую с векторной диаграммой токов.

Откладываем в масштабе тока $m = 1 A/cm$ векторы токов $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ на комплексной плоскости. Для суждения о напряжениях между различными токами электрической цепи строим топографическую диаграмму в масшта-

бе $m = 5 \text{ В/см}$. Топографическая диаграмма строится для замкнутого контура. Направление обхода выбирается против направления тока в элементах цепи.

Все векторы падения напряжений на элементах цепи замкнутого контура имеют определённое направление:

$$1) \dot{U}_{de} = jX_{L3} \cdot \dot{I}_3 = 2,04e^{j90} \cdot 4,44e^{j74} = 9,1e^{j164} \text{ опережает ток } \dot{I}_3 \text{ на угол } 90^\circ;$$

$$2) \dot{U}_{eb} = r_3 \cdot \dot{I}_3 = 3 \cdot 4,44e^{j74} = 13,3e^{j74} \text{ совпадает по фазе с током } \dot{I}_3;$$

$$3) \dot{U}_{bf} = -jX_{C1} \cdot \dot{I}_1 = 11,37e^{-j90} \cdot 7,17e^{j60} = 81,5e^{-j30} \text{ отстает от тока } \dot{I}_1 \text{ на угол } 90^\circ;$$

$$4) \dot{U}_{fa} = r_1 \cdot \dot{I}_1 = 4 \cdot 7,17e^{j60} = 28,7e^{j60} \text{ совпадает по фазе с током } \dot{I}_1;$$

$$5) \dot{U}_{cm} = \dot{I}_2 \cdot r_2 = 3,03 \cdot e^{j40} \cdot 2 = 6,06e^{j40} \text{ совпадает по фазе с током } \dot{I}_2;$$

$$6) \dot{U}_{cm} = \dot{I}_2 \cdot jX_{L2} = 3,03 \cdot e^{j40} \cdot 4,93 \cdot e^{j90} = 14,9e^{j130} \text{ опережает ток } \dot{I}_2 \text{ на угол } 90^\circ.$$

Таким образом, входное напряжение по второму закону Кирхгофа удовлетворяет равенству

$$\begin{aligned} \dot{U}_{ex} &= \dot{U}_{de} + \dot{U}_{eb} + \dot{U}_{bf} + \dot{U}_{fa} = 9,1e^{j64} + 13,3e^{j74} + 81,5e^{-j30} + 28,7e^{j60} = \\ &= -8,747 + j2,508 + 3,666 + j12,785 + 70,581 - j40,75 + 14,350 + j24,855 = \\ &= 79,85 - j0,602 = 79,85e^{j0} \approx 80 \text{ В} \end{aligned}$$

5) определяем показания вольтметра и ваттметра

Показания вольтметра определяем из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа для контура bdb

$$\begin{aligned} -\dot{U}_V + \dot{I}_3(r_3 + jX_{L3}) &= 0 \\ \dot{U}_V = \dot{I}_3(r_3 + jX_{L3}) &= 4,44e^{j74} \cdot 3,63e^{j34} = 1,61e^{j108} \text{ В.} \end{aligned}$$

$$\text{Показания вольтметра } U_V = 16,1 \text{ В.}$$

Ваттметр показывает активную мощность $P = UI \cos \varphi$.

где U и I – действующие значения напряжения и тока;

φ – угол сдвига по фазе между напряжением и током.

$$I_{\text{ток}} \dot{I}_1 = 7,17e^{j60} \text{ А.}$$

Напряжение $U = 80\text{ В}$

Сдвиг по фазе между векторами напряжения и тока

$$\varphi_3 = \psi_u - \psi_i = 0 - 60^\circ = -60^\circ.$$

Показание ваттметра равно

$$P = UI \cos \varphi = 80 \cdot 7,17 \cdot \cos(-60^\circ) = 286,8 \text{ Вт}.$$

Можно определить показания ваттметра через комплексную мощность

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}_1^*,$$

где $\dot{U}$ - комплекс напряжения, приложенного к ваттметру;

$\dot{I}_1^*$ - сопряжённый комплекс тока, протекающий через токовую обмотку ваттметра.

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}_1^* = 80e^{j0} \cdot 7,17e^{-j60} = 573,6e^{-j60} = 286,8 - j496,8 \text{ ВА}.$$

Показание ваттметра равно действительной части комплексной мощности

$$P = 286,8 \text{ Вт}.$$

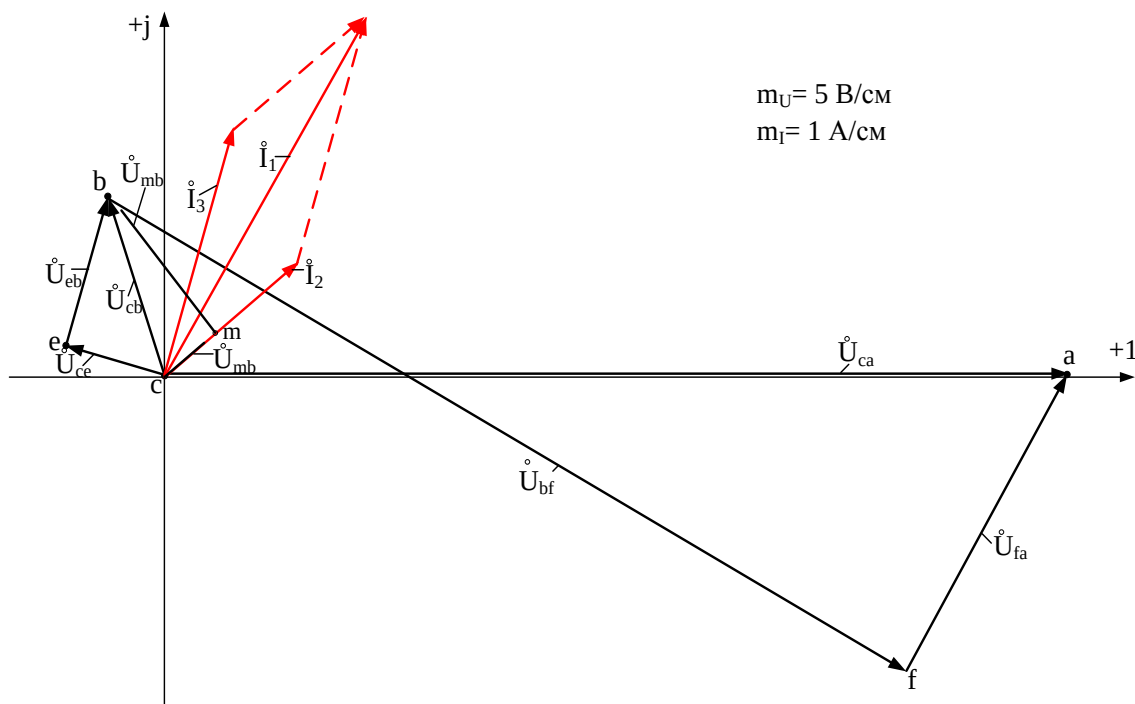


Рис.2.8. Совмещенная векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений

6) для построения временных характеристик значений тока и напряжения, проходящие в ваттметре, запишем их мгновенные значения

$$u_1 = 80 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 0) = 113,1 \cdot \sin \omega t \text{ В.}$$

$$i_1 = 7,17 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 60^\circ) = 10,1 \cdot \sin(\omega t + 60^\circ) \text{ А.}$$

Для расчёта координат точек кривых $i_1 = f_1(\omega t)$ и $u_1 = f_2(\omega t)$ составляем таблицу

ωt	0	30	60	90	120	150	180
$\omega t + 0$	0	30	60	90	120	150	180
$\sin \omega t$	0	0,5	0,87	1	0,87	0,5	0
$u_1, \text{В}$	0	56,6	98,4	113,1	98,4	56,6	0
$(\omega t + 60)$	60	90	120	150	180	210	240
$\sin(\omega t + 60)$	0,87	1	0,87	0,5	0	-0,5	-0,87
$i_1, \text{А}$	8,8	10,1	8,8	5,1	0	-5,1	-8,8

Откладываем в масштабе тока $m_I = 2 \text{ А/см}$ синусоиду временной характеристики тока $i_1 = f_1(\omega t)$ и в масштабе $m_U = 20 \text{ В/см}$ синусоиду временной характеристики напряжения $u_1 = f_2(\omega t)$.

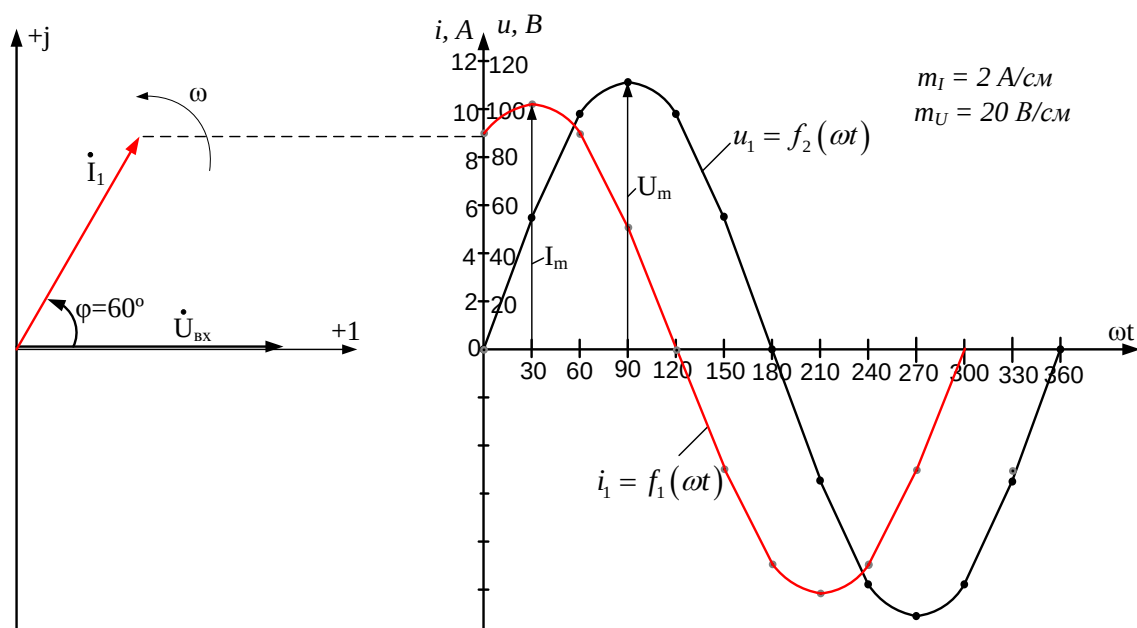


Рис.2.9. Временные характеристики тока и напряжения

ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 2.1

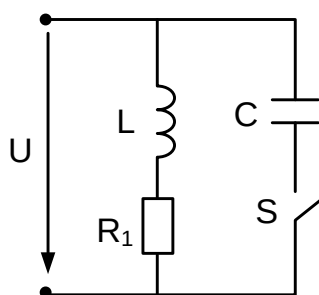


Рис. 2.10.

В схеме на рисунке 2.10 известны напряжения U на входе, потребляемая цепью активная мощность P , частота тока f . В неразветвленной части цепи ток при разомкнутом ключе S равен I_1 , а при замкнутом ключе - I_2 . Рассчитать сопротивление резистора R , индуктивность катушки L и емкость конденсатора C . Построить

векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Таблица 2.1

Вариант	Данные к задаче 2.1				
	$U, В$	$P, Вт$	$f, Гц$	$I_1, А$	$I_2, А$
1	100	200	50	5	3
2	80	160	100	3	2,5
3	220	50	400	1	0,5
4	150	400	50	4	3
5	200	60	60	0,8	0,4
6	20	100	25	10	8
7	40	80	50	6	3
8	60	240	40	10	6
9	250	200	30	2	1
10	120	40	80	0,9	0,6
11	500	50	400	0,5	0,3
12	80	20	100	0,8	0,4
13	100	50	75	2	1,5
14	130	80	50	1,5	1
15	240	120	100	4	1,6
16	35	140	60	10	7
17	18	50	80	4	3
18	25	100	70	5	4
19	40	120	100	7	3,2
20	80	160	50	4	3

Задача 2.2

В цепи переменного тока (рис. 2.11) наблюдается резонанс токов. Известны ток I_1 через резистор R_1 , I_2 через резистор R_2 , сопротивление индуктивной катушки переменному току X_L . При этом $R_1 = nX_L$. Найти напряжение сети

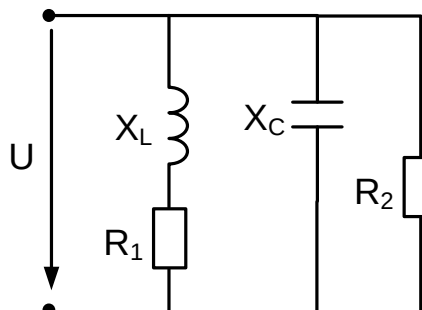


Рис. 2.11.

U , сопротивление резистора R_2 , общий ток I , емкость конденсатора C и индуктивность катушки L , если частота переменного тока равна f . Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Таблица 2.2

Вариант	Данные к задаче 2.2				
	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$X_L, \text{Ом}$	n	$f, \text{Гц}$
1	5	2	4	3	50
2	8	3	5	2	60
3	10	8	15	1,5	80
4	3	2	20	0,6	120
5	6	3	30	0,5	400
6	12	4	25	0,8	90
7	7	5	10	0,7	70
8	14	8	16	1,4	85
9	3	2	18	1,2	100
10	16	12	3	2	50
11	4	2	15	0,6	105
12	8	3	18	1,5	88
13	13	12	35	0,3	55
14	5	4	15	0,8	65
15	3	1	4	0,5	300
16	14	8	6	0,4	80
17	12	7	20	1,8	100
18	18	10	33	1,5	95
19	22	14	8	1,6	120
20	20	7	14	2,0	240

Задача 2.3

В цепи переменного тока с частотой f (рис. 2.12) известны сопротивление

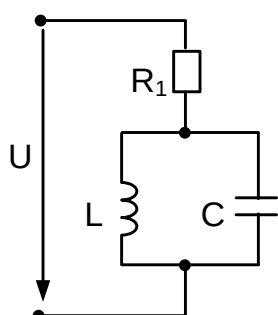


Рис 2.12.

резистора R , индуктивность катушки L и емкость конденсатора C . Рассчитать полное сопротивление цепи. Найти ток через каждый элемент цепи, если напряжение сети равно U . Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Таблица 2.3

Вариант	Данные к задаче №2.3				
	$R, \text{Ом}$	$L, \text{мГн}$	$C, \text{мкФ}$	$f, \text{Гц}$	$U, \text{В}$
1	5	6	100	250	80
2	15	70	150	50	220
3	8	60	120	100	150
4	30	5	32	400	60
5	50	50	10	200	300
6	10	40	240	50	120
7	100	80	6	300	110
8	25	30	25	180	200
9	150	500	20	60	90
10	60	40	18	150	60
11	10	12	50	250	250
12	30	130	80	50	100
13	15	120	60	90	140
14	3	1	300	400	50
15	100	90	5	180	210
16	20	80	120	60	110
17	50	40	14	300	250
18	12	15	50	170	120
19	70	250	40	65	140
20	30	20	40	140	80

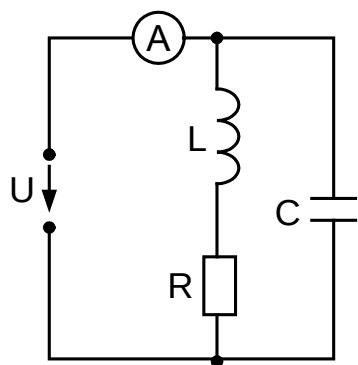
Задача 2.4

Рис. 2.13.

В цепь синусоидального тока с частотой f включены катушка индуктивности L , резистор R и конденсатор C (рис. 2.13). Известны f , U , L и R . Рассчитать емкость конденсатора C , при которой будет наблюдаться резонанс токов. Определить показание амперметра. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Таблица 2.4

Вариант	Данные к задаче 2.4			
	f , Гц	U , В	L , Гн	R , Ом
1	50	150	0,5	100
2	60	80	0,1	20
3	80	75	0,15	10
4	400	50	0,2	30
5	50	60	0,25	10
6	100	100	0,25	10
7	80	35	1,0	100
8	40	250	2,0	300
9	60	120	0,05	80
10	50	70	0,12	30
11	400	85	0,03	40
12	50	220	0,5	15
13	90	45	0,1	30
14	100	90	1,5	150
15	50	110	0,8	90
16	80	75	0,1	100
17	50	65	0,25	50
18	100	80	0,2	15
19	400	65	0,03	60
20	50	120	0,8	90

Задача 2.5

Нагрузка в цепи переменного тока состоит из последовательно включенных резистора R и индуктивной катушки L . Действующее напряжение сети равно U , активная мощность при частоте f_1 составляет P . Найти активную мощность в случае изменения частоты до значения f_2 при условии, что действующее значение напряжения остается тем же. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Таблица 2.5

Вариант	Данные к задаче 2.5				
	L , мГн	P , Вт	U , В	f_1 , Гц	f_2 , Гц
1	0,1	1,0	15	50	400
2	0,05	10	25	25	50
3	0,01	5	10	60	200
4	0,02	3,0	12	80	400
5	0,03	15	25	40	180
6	0,15	5,0	80	100	200
7	2,0	5,0	120	20	60
8	3	1	75	50	100
9	0,2	8	50	40	120
10	1	0,5	40	30	75
11	0,2	2,0	20	40	60
12	0,1	6	50	100	200
13	0,02	40	100	400	100
14	0,02	5	18	70	150
15	0,03	10	20	50	100
16	0,2	35	45	15	40
17	1	10	100	50	90
18	1,5	3	50	20	50
19	0,3	6	60	60	30
20	0,5	8	65	40	75

Задача 2.6

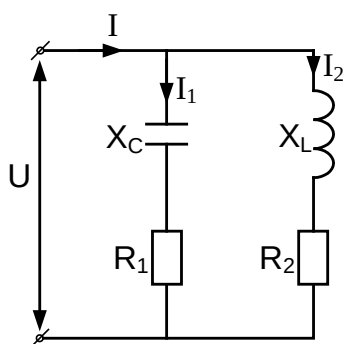


Рис 2.14.

В цепи переменного тока частотой 50 Гц известны X_C , R_1 , R_2 , I_1 . Рассчитать напряжение, ток, протекающий через резистор R_2 и ток в неразветвленной части цепи I (рис. 2.14). Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Таблица 2.6

Вариант	Данные к задаче 2.6				
	X_C , Ом	X_L , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	I_1 , А
1	8	12	5	8	5
2	4	16	10	6	3
3	6	4	8	15	8
4	15	10	20	25	2
5	40	20	15	20	3
6	16	8	6	8	4
7	24	16	18	14	6
8	10	14	24	20	5
9	110	200	120	240	1
10	10	20	30	22	20
11	200	85	100	120	2
12	100	150	95	180	1
13	65	100	110	70	3
14	150	80	180	100	2
15	35	14	18	40	10
16	15	40	30	20	15
17	7	12	21	8	25
18	120	90	200	150	2
19	160	200	100	80	3
20	30	10	40	8	11

Задача 2.7

В цепи переменного тока частотой 50 Гц (рис. 2.15) известны U_C , L , C , R_1 , R_2 . Рассчитать напряжение на каждом элементе схемы, ток и общее

напряжение. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

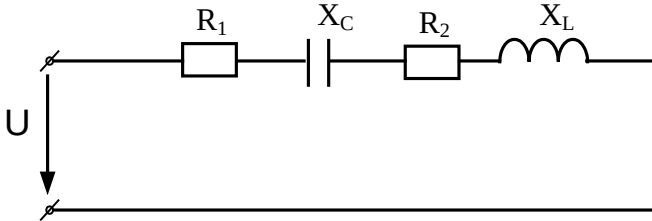


Рис. 2.15.

Таблица 2.7

Вариант	Данные к задаче 2.7				
	U_C , В	L , мГн	C , мкФ	R_1 , Ом	R_2 , Ом
1	20	40	100	20	30
2	50	60	150	40	60
3	12	20	1000	50	80
4	25	5	2000	3	4
5	15	100	500	15	20
6	40	150	50	40	70
7	18	50	200	15	25
8	30	80	180	20	30
9	20	120	400	25	20
10	15	45	90	18	32
11	10	65	180	35	50
12	25	120	600	18	28
13	8	80	60	40	55
14	14	8	1500	60	70
15	22	25	1000	45	90
16	10	100	550	12	22
17	15	12	750	10	16
18	20	60	250	35	50
19	6	200	200	70	60
20	25	10	500	50	35

Тестовые задания для самоконтроля

Тема: Цепи однофазного переменного тока

Тест 2.1

№1. Частота синусоидального тока определяется в соответствии с выражением.....

1. $f = \frac{T}{2p};$

2. $f = T;$

3. $f = \frac{1}{T};$

4. $f = 2pT.$

№2. В электрической цепи с последовательно включенными активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью наблюдается резонанс. Как он называется?

1. Резонанс токов;

2. Резонанс напряжений;

3. Резонанс мощностей.

№3. Реактивная мощность Q цепи, имеющей входное комплексное сопротивление $\underline{Z} = R + jX$, можно определить по формуле.....

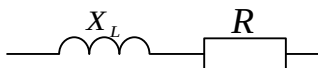
1. $Q = I^2 \cdot Z;$

2. $Q = U^2 \cdot Z;$

3. $Q = I \cdot X^2;$

4. $Q = I^2 X.$

№4. Полное сопротивление Z приведенной цепи при $X_L = 30 \text{ Ом}$ и $R = 40 \text{ Ом}$ составляет.....



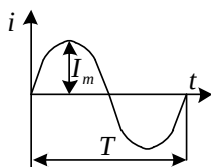
1. 10 Ом;

2. 1200 Ом;

2. 70 Ом;

4. 50 Ом.

№5. Чему равно действительное значение тока для данной временной диаграммы, если $I_m = 2 \text{ А}$?



1. 1 А;

2. 1,4 А;

3. 2 А;

4. 2,8 А.

Тест 2.2

№1. Емкостное сопротивление равно.....

1. $1/\omega C$;
2. $1/\omega L$;
3. ωL ;
4. ωC .

№2. Каково соотношение между амплитудным и действующим значением синусоидального тока?

1. $I = \frac{I_m}{2}$;
2. $I = I_m$;
3. $I = 0,707 \cdot I_m$;
4. $I_m = \frac{I}{\sqrt{2}}$.

№3. Угловая частота ω при частоте синусоидального тока f , равной 50Гц, составит....

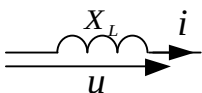
1. $0,01 \text{ с}^{-1}$;
2. 314 с^{-1} ;
3. 100 с^{-1} ;
4. 628 с^{-1} .

№4. Критерии возникновения резонансного явления в цепи, содержащей индуктивные и емкостные элементы, являются....

1. Равенство нулю активного сопротивления цепи R;
2. Равенства π угла сдвига фаз φ между напряжением и током на входе цепи;
3. Равенство L и C;
4. Равенство нулю угла сдвига фаз φ между напряжением и током на входе цепи.

№5. Действующие значения тока в индуктивном элементе, при амплитудном напряжении 314 В и величине сопротивления, равного 100 Ом, составит.....

1. 3,14 А;
2. 2,2 А;
3. 100 А;
4. 314 А.



3 Трехфазные электрические цепи

3.1 Трехфазная система. Источник трехфазного напряжения

Трехфазная система электрических токов (ЭДС, напряжений) – это совокупность трех синусоидальных электрических токов (ЭДС, напряжений) одной частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе относительно друг друга на 120° . При равенстве амплитудных токов (ЭДС, напряжений) во всех фазах систему называют **симметричной**.

Часть этой системы, где проходит один из токов, называют **фазой трехфазной системы**.

Простейший трехфазный генератор - устройство, аналогичное однофазному генератору, но имеющее в отличие от последнего три одинаковые обмотки (фазы) на якоре, начала и концы которых обозначаются соответственно А, В, С и Х, Y, Z. Эти обмотки сдвинуты в пространстве относительно друг друга на равные углы $\frac{2\pi}{3} = 120^\circ$.

При вращении якоря в обмотках генератора индуцируется ЭДС одной частоты и равной амплитуды, сдвинутые по фазе на 120° относительно друг друга.

Если отдельные фазы генератора и приемника соединены между собой, то такую систему называют **связанной** трехфазной системой, в которой фазы могут быть соединены в звезду и треугольник.

3.2 Соединение обмоток генератора и приемника в звезду

Звезда - это такое соединение, когда к началам обмоток генератора А, В, С присоединяются три линейных провода, идущих к приемнику, а концы обмоток Х, Y, Z соединены в узел, называемый **нейтральной** или **нулевой точкой**. Таким же способом можно соединить приемник (нагрузку) в трехфазной системе. Начало фаз приемника обозначается а, b, с; концы х, у, z (рис. 3.1).

В четырехпроводной системе к этой точке присоединен нейтральный или нулевой провод, в трехпроводной системе он отсутствует.

Напряжение между началами и концами фаз генератора или между проводами и нейтральным (нулевым) проводом называют **фазным напряжением** и обозначают U_A, U_B, U_C или U_a, U_b, U_c . Напряжение между любыми двумя линейными проводами называют линейным напряжением и обозначают U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} и U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} .

Токи, проходящие по линейным проводам, называют **линейными** и обозначают I_A, I_B, I_C . Токи, проходящие в фазах, называются **фазными**.

При соединении в звезду линейные токи равны соответствующим фазным токам:

$$I_L = I_\phi, \quad (3.1)$$

где I_L - линейный ток, А;

I_ϕ - фазный ток, А.

Линейное напряжение равно разности векторов соответствующих фазных напряжений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_L \cdot e^{j30} = \dot{U}_A - \dot{U}_B \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_L \cdot e^{-j90} = \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_L \cdot e^{j150} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \end{aligned} \quad (3.2)$$

Для симметричной системы напряжений

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\phi, \quad (3.3)$$

где U_L - линейное напряжение, В;

U_ϕ - фазное напряжение, В.

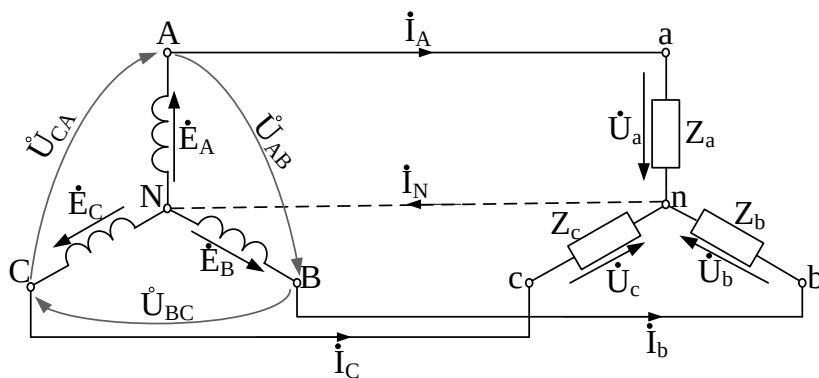


Рис.3.1. Трехфазная система соединения «звезда» с нейтральным проводом

Векторная сумма линейных напряжений всегда равна нулю.

При соединении приемников энергии в звезду трехфазная цепь может быть четырехпроводной (рис 3.1) и трехпроводной.

Действующее значение токов в фазах приемников:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}, I_B = \frac{U_B}{Z_B}, I_C = \frac{U_C}{Z_C}; \quad (3.4)$$

где U_A, U_B, U_C - действующее значение фазных напряжений, В;

Z_A, Z_B, Z_C - полные сопротивления фаз приемников, Ом.

В четырехпроводной системе ток в нейтральном проводе равен векторной сумме токов отдельных фаз

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C, \quad (3.5)$$

где $\dot{I}_N$ - ток в нейтральном проводе, А.

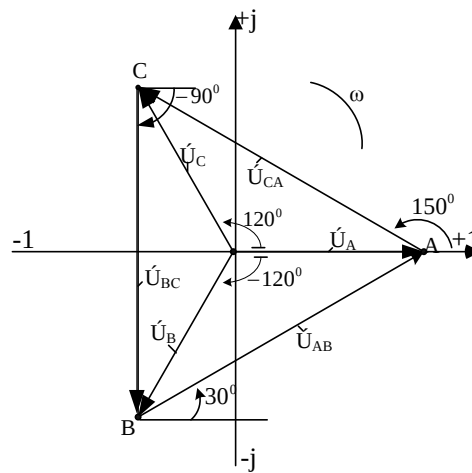


Рис.3.2. Векторная диаграмма напряжений

В четырехпроводной трехфазной цепи при симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке, то есть равенстве полных сопротивлений фаз приемников $Z_A = Z_B = Z_C$, ток в нейтральном проводе равен нулю.

Активная мощность всей цепи равна при неравномерной нагрузке сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C, \quad (3.6)$$

где P_A, P_B, P_C - активные мощности фаз А, В и С, Вт;

$$\begin{aligned}
 P_A &= U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi_A, \\
 P_B &= U_B \cdot I_B \cdot \cos \varphi_B, \\
 P_C &= U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi_C.
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Реактивная мощность всей цепи при неравномерной нагрузке равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C, \tag{3.8}$$

где Q_A, Q_B, Q_C – реактивная мощность фаз А, В, С, вар;

$$\begin{aligned}
 Q_A &= U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi_A, \\
 Q_B &= U_B \cdot I_B \cdot \sin \varphi_B, \\
 Q_C &= U_C \cdot I_C \cdot \sin \varphi_C.
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Полная потребляемая мощность цепи при неравномерной нагрузке, В·А

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \tag{3.8}$$

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке активная мощность всей цепи

$$P = 3U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi. \tag{3.9}$$

Реактивная мощность всей цепи

$$Q = 3U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi. \tag{3.10}$$

Полная мощность всей цепи

$$S = 3U_\phi \cdot I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L. \tag{3.11}$$

3.3 Соединение обмоток генератора и приемников энергии в треугольник

Соединение обмоток трехфазного генератора в треугольник показано на рисунке 3.3.

При соединении приемника энергии в треугольник (рис 3.3) сопротивления Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} подключают непосредственно к линейным проводам, поэтому линейные напряжения являются одновременно и фазными для приемников.

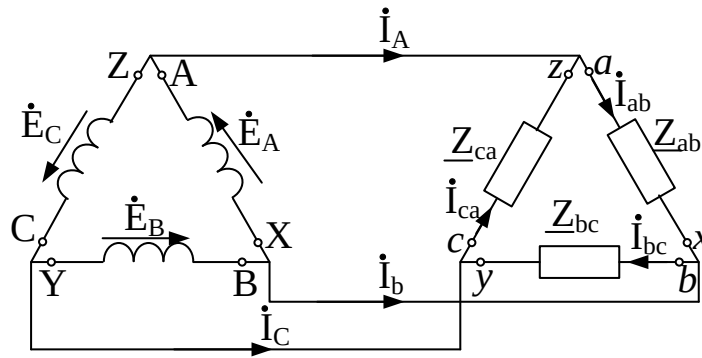


Рис. 3.3. Трехфазная система соединения треугольником

Фазные напряжения на генераторе являются и линейными

$$U_{\text{л}} = U_{\phi}, \quad (3.12)$$

$$U_A = U_{AB}, \quad U_B = U_{BC}, \quad U_C = U_{CA}. \quad (3.13)$$

Положительное направление линейных и фазных токов указано на рисунке 3.3.

Соотношение между фазными и линейными токами можно записать, применив первый закон Кирхгофа для узлов А, В и С

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

где $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ - линейные токи трехфазной цепи, А;

$\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$ - токи в фазах, А.

Вектор любого линейного тока находится как разность векторов соответствующих фазных токов.

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке, то есть при $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$, имеем

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}. \quad (3.14)$$

Определение полной, активной и реактивной мощностей цепи при неравномерной и равномерной нагрузках рассчитываются по формулам (3.6) – (3.11).

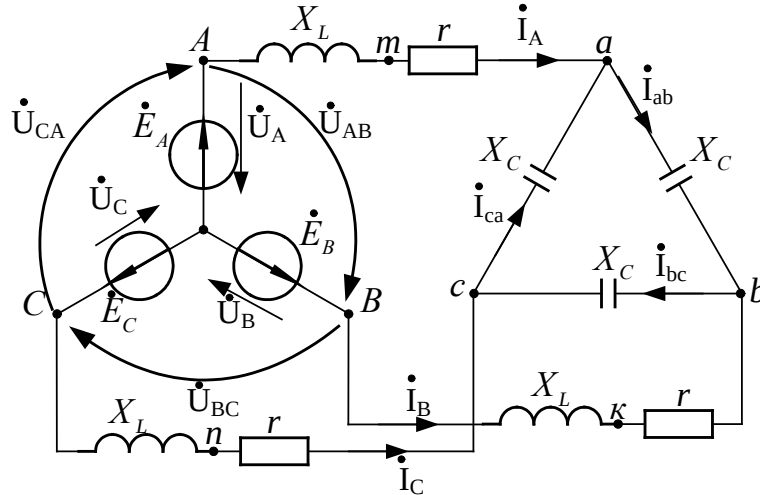
ПРИМЕР 3.**Дано:**
 $E_A = 30 \text{ В}, T = 0,015 \text{ с}; L = 17,94 \text{ мГн}, C = 79,7 \text{ мкФ}; R = 4,33 \text{ Ом}.$


Рис 3.4. Исходная схема

- Найти:** 1) рассчитать токи в фазах нагрузки и линейных проводах;
 2) рассчитать напряжение на фазе потребителя и падение напряжения в проводах;
 3) построить совмещённую векторную диаграмму токов (ВДТ) и топографическую диаграмму напряжений (ТДН);
 4) определить мгновенное значение напряжения и подсчитать активную и реактивную мощность трёхфазной цепи.

Решение**1) находим сопротивление каждой фазы**

$$X_C = \frac{1}{\omega C}; \quad X_L = \omega L,$$

где ω – угловая частота, с^{-1} .

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \cdot 3,14}{0,015} = 418,88 \text{ с}^{-1},$$

$$X_C = \frac{1}{418,88 \cdot 79,7 \cdot 10^{-6}} = 30 \text{ Ом},$$

$$X_L = 418,88 \cdot 17,94 \cdot 10^{-3} = 7,5 \text{ Ом}.$$

Симметричный потребитель, соединенный треугольником, имеет сопротивление фаз

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = -jX_C = -j30 = 30e^{-j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Сопротивление каждого из линейных проводов равно

$$\underline{Z}_\lambda = r + jX_C = 4,33 + j7,5 = 8,66e^{j60^\circ} \text{ Ом}.$$

2) рассчитываем токи в фазах нагрузки и линейных проводах

Запишем напряжения в начале линии в комплексной форме

$$\dot{U}_\phi = E_A \cdot e^{j\varphi} = 30 \cdot e^{j\varphi}.$$

$$\text{Фазные} \begin{cases} \dot{U}_A = \dot{U}_\phi \cdot e^{j0} = 30 \cdot e^{j0} = 30 \text{ В}; \\ \dot{U}_B = \dot{U}_\phi \cdot e^{-j120} = 30 \cdot e^{-j120} = (-15 - j25,98)\text{В}; \\ \dot{U}_C = \dot{U}_\phi \cdot e^{j120} = 30e^{j120} = (-15 + j25,98)\text{В}. \end{cases}$$

$$\dot{U}_\lambda = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_\phi = \sqrt{3} \cdot 30 \cdot e^{j\varphi} = 51,96 \cdot e^{j\varphi} \text{ В}$$

$$\text{Линейные} \begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_\lambda \cdot e^{j30} = 51,96 \cdot e^{j30} = (45 + j25,98)\text{В}; \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_\lambda \cdot e^{-j90} = 51,96 \cdot e^{-j90} = (-j51,96)\text{В}; \\ \dot{U}_C = \dot{U}_\lambda \cdot e^{j150} = 51,96e^{j150} = (-45 + j25,98)\text{В}. \end{cases}$$

Заменяем реактивный треугольник нагрузки на эквивалентную звезду (рис. 3.5).

Сопротивление луча звезды

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \frac{(-jX_C) \cdot (-jX_C)}{(-jX_C) + (-jX_C) + (-jX_C)} = \frac{(-jX_C)^2}{3 \cdot (-jX_C)} = \frac{-jX_C}{3};$$

$$\underline{Z}_a = \frac{30e^{-j90}}{3} = 10e^{-j90} = -j10 \text{ Ом}.$$

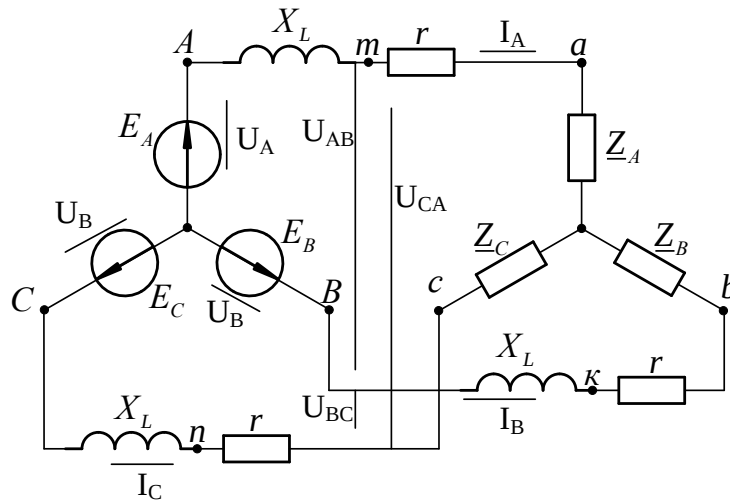


Рис 3.5. Схема замещения

Сопротивление каждой фазы с учётом сопротивления линейного провода для схемы (рис. 3.5)

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = Z_L + \underline{Z}_a = 4,33 + j7,5 - j10 = 4,33 - j2,5 = 5e^{-j30} \text{ Ом.}$$

Определяем линейные токи потребителя

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{30e^{j0}}{5e^{-j30}} = 6e^{j30} = (5,2 + j3) \text{ А;}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{30e^{-j120}}{5e^{-j30}} = 6e^{-j90} = (-j6) \text{ А;}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{30e^{j120}}{5e^{-j30}} = 6e^{j150} = (-5,2 + j3) \text{ А.}$$

Проверяем правильность найденных токов по первому закону Кирхгофа $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$,

$$5,2 + j3 - j6 - 5,2 + j3 = 0.$$

3) определяем фазные и линейные напряжения на нагрузке

$$\dot{U}_a = \underline{Z}_a \cdot \dot{I}_A = 10e^{-j90} \cdot 6e^{j30} = 60e^{-j60} = (30 - j51,96) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_b = \underline{Z}_b \cdot \dot{I}_B = 10e^{-j90} \cdot 6e^{-j90} = 60e^{-j180} = (-60) \text{ В;}$$

$$\dot{U}_c = \underline{Z}_c \cdot \dot{I}_C = 10e^{-j90} \cdot 6e^{j150} = 60e^{j60} = (30 + j51,96) \text{ В.}$$

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b = 30 - j51,96 + 60 = 90 - j51,96 = 103,92e^{-j30} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c = -60 - 30 - j51,96 = -90 - j51,96 = 103,92e^{-j150} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a = 30 + j51,96 - 30 + j51,96 = j103,92 = 103,92e^{j90} \text{ В.}$$

Падение напряжения в линейном проводе

$$\dot{U}_{Aa} = \underline{Z}_L \cdot \dot{I}_A = 8,66e^{j60} \cdot 6e^{j30} = 51,96e^{j90} = j51,96 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Bb} = \underline{Z}_L \cdot \dot{I}_B = 8,66e^{j60} \cdot 6e^{-j90} = 51,96e^{-j30} = (45 - j25,98) \text{ В};$$

$$\dot{U}_{Cc} = \underline{Z}_L \cdot \dot{I}_C = 8,66e^{j60} \cdot 6e^{j150} = 51,96e^{j210} = (-45 - j25,98) \text{ В.}$$

4) определяем фазные токи на нагрузке

$$\dot{I}_{ab} = \frac{U_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{103,92e^{-j30}}{30e^{-j90}} = 3,46e^{j60} = (1,73 + j3) \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{U_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{103,92e^{-j150}}{30e^{-j90}} = 3,46e^{-j60} = (1,73 - j3) \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{U_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{103,92e^{j90}}{30e^{-j90}} = 3,46e^{j180} = -3,46 \text{ А.}$$

5) строим совмещённую векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений

Построение топографической диаграммы напряжений и векторной диаграммы токов начинаем с построения звезды фазных напряжений источника в масштабе напряжения $m = 10 \text{ В/см}$. Вектор напряжения U_A откладывается по вещественной оси (-1; +1) из начала координат (О, О'). От вектора U_A на 120° развернуты векторы напряжения U_B и U_C при чем вектор U_B отстает от U_A , а U_C опережает. Полученные точки А, В, С образуют треугольник, состоящий из линейных напряжений генератора U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . Фазное напряжение приемника U_a откладывается относительно вещественной оси на $\varphi = -60^\circ$. Относительно вектора U_a развернуты U_b на $\varphi = -120^\circ$ и U_c на $\varphi = 120^\circ$. При соединении точек a, b, c образуется треугольник линейных напряжений приемника. Вектора падения напряжений на линейных проводах строятся по расчетам пункта 3.

Векторная диаграмма токов строится с учетом расчета пунктов 2 и 4. В вершинах треугольника фазных напряжений откладываем соответствующие векторы фазных токов I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} . Вектор I_{ab} строится из начала векто-

ра U_{ab} , смещенный относительно вещественной оси на угол равный 60° . Оставшиеся токи на приемнике соединенного треугольником строятся аналогично относительно одноименных векторов напряжения приемника. Токи в линейных проводах строятся с помощью расчетов в пункте 2 с учетом первого закона Кирхгофа (3.13).

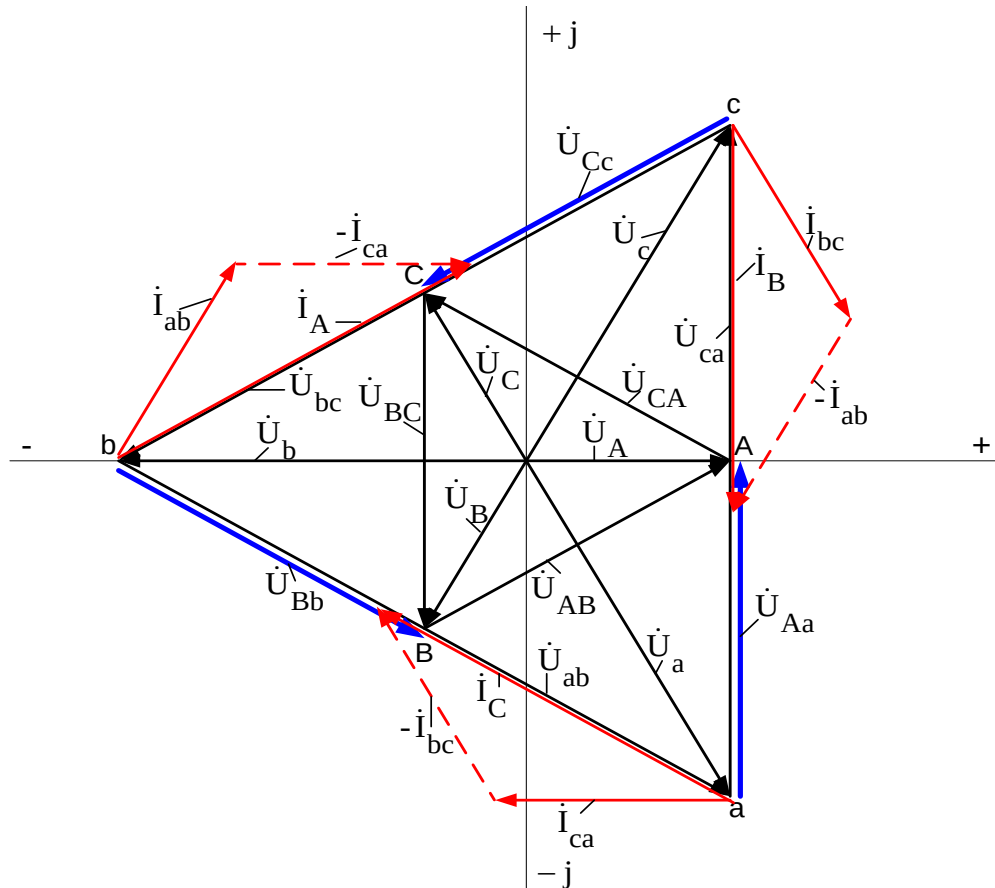


Рис.3.6. Совмещенная векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений

6) определяем мощности симметричной трёхфазной системы

Поскольку трёхфазная цепь представляет собой совокупность трёх однофазных электрических цепей, то её полную мощность можно представить в виде суммы мощностей всех трёх фаз

$$\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C.$$

Определим мощность каждой фазы

$$\underline{S}_A = \dot{U}_A \cdot \dot{I}_A^* = 30e^{j0} \cdot 6e^{-j30} = 180e^{-j30} = (155,88 - j90) \text{ ВА};$$

$$\underline{S}_B = \dot{U}_B \cdot \dot{I}_B^* = 30e^{-j120} \cdot 6e^{j90} = 180e^{-j30} = (155,88 - j90) \text{ ВА};$$

$$\underline{S}_C = \dot{U}_C \cdot I_C^* = 30e^{j120} \cdot 6e^{-j150} = 180e^{-j30} = (155,88 - j90) \text{ ВА}.$$

Из полученных значений следует, что мощности фаз равны

$$\underline{S}_A = \underline{S}_B = \underline{S}_C.$$

Полная мощность равна

$$\underline{S} = 3\underline{S}_A = 3 \cdot (155,88 - j90) = (467,64 - j270) = 540e^{-j30} \text{ ВА}.$$

Активная мощность равна

$$P = P_A = P_B = P_C = U \cdot I \cdot \cos \psi,$$

где ψ – угол между вектором напряжения и вектором тока.

$$\psi = \varphi_u - \varphi_i$$

$$\psi_A = 0^\circ - 30^\circ = -30^\circ;$$

$$\psi_B = -120^\circ - (-90^\circ) = -30^\circ;$$

$$\psi_C = 120^\circ - 150^\circ = -30^\circ. \text{ тогда } \psi_A = \psi_B = \psi_C.$$

$$P = 30 \cdot 6 \cdot \cos(-30) = 30 \cdot 6 \cdot 0,866 = 155,88 \text{ Вт}.$$

Реактивная мощность равна:

$$Q = Q_A = Q_B = Q_C = U \cdot I \cdot \sin \psi = 30 \cdot 6 \cdot \sin(-30^\circ) = -90 \text{ вар}$$

Знак (-) говорит о преобладании емкостной нагрузки

$$P = 155,88 \text{ Вт}. \quad Q = 90 \text{ вар}.$$

ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 3.1

К трехфазной сети с линейными напряжениями U_L подключена симметричная нагрузка по схеме «звезда». Каждая фаза нагрузки состоит из последовательно соединенных активного сопротивления R и индуктивного сопротивления X_L . К этой же сети подключены конденсаторы по схеме «треугольник», сопротивление каждого X_C . Рассчитать активную и реактивную составляющие линейных токов. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Таблица 3.1

Вариант	Данные к задаче 3.1			
	$U_L, В$	$R, Ом$	$X_L, Ом$	$X_C, Ом$
1	220	5	8	4
2	380	15	6	8
3	660	35	16	40
4	220	7	4	12
5	380	25	18	30
6	660	14	12	24
7	220	3	4	5
8	380	105	56	84
9	660	13	18	30
10	220	30	10	60
11	380	13	20	9
12	660	8	14	19
13	220	48	70	90
14	380	100	60	70
15	660	56	85	94
16	220	13	26	44
17	380	46	72	64
18	660	17	11	8
19	220	4	3	6
20	380	12	5	10

Задача 3.2

Симметричная нагрузка включена в трехфазную сеть переменного тока частотой f (Гц) по схеме «звезда» без нейтрального провода. Дано линейное напряжение, равное U_L . В цепи каждой фазы последовательно включены резистор R и конденсатор с емкостью C . Начертить схему цепи. Рассчитать токи в цепи каждой фазы, а также активную, реактивную и полную мощности трехфазной сети. Построить ВДТ и ТДН.

Таблица 3.2

Вариант	Данные к задаче 3.2			
	f , Гц	U_L , В	R , Ом	C , мкФ
1	50	220	2	1000
2	400	110	15	200
3	60	200	8	300
4	50	380	3	2000
5	100	30	15	300
6	60	115	25	200
7	400	100	50	30
8	50	660	30	150
9	150	45	10	100
10	50	220	5	300
11	60	210	50	150
12	400	115	40	25
13	50	380	21	450
14	100	100	48	90
15	60	115	60	200
16	50	380	14	800
17	50	6000	350	80
18	100	110	16	130
19	50	220	34	250
20	50	380	6	800

Задача 3.3

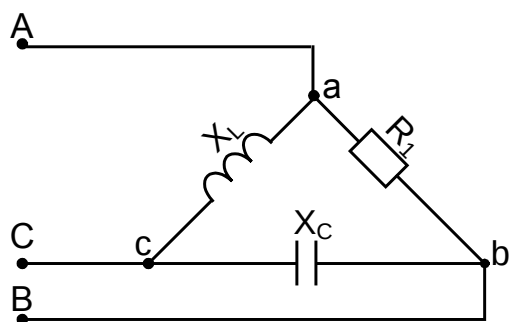


Рис. 3.8.

Несимметричная трехфазная нагрузка включена по схеме треугольник (рис.3.8). Дано линейное напряжение U_L , а также сопротивление фаз нагрузки R , X_L , X_C . Рассчитать токи в линейных проводах А, В, С. Построить совмещённую векторную диаграмму токов (ВДТ) и топографическую диаграмму напряжений (ТДН).

ков (ВДТ) и топографическую диаграмму напряжений (ТДН).

Таблица 3.3

Вариант	Данные к задаче 3.3			
	$U_L, В$	$R, Ом$	$X_L, Ом$	$X_C, Ом$
1	100	5	4	10
2	220	11	20	22
3	60	15	15	15
4	75	25	15	25
5	80	10	16	8
6	90	18	9	15
7	100	20	25	40
8	120	30	40	20
9	40	8	4	10
10	168	7	6	8
11	240	16	15	24
12	110	10	11	22
13	220	20	22	10
14	160	32	20	16
15	200	50	40	50
16	150	5	3	5
17	120	3	4	4
18	100	5	4	10
19	60	6	12	5
20	80	10	8	4

Задача 3.4

В трехфазную сеть с нейтральным проводом включены резисторы R_1 и R_2 , конденсатор C и индуктивность L с известными параметрами (рис 3.9). Частота переменного тока 50 Гц, фазное напряжение U_ϕ . Построить ТДН и ВДТ. По диаграмме, выполненной в масштабе, найти ток в нейтральном проводе.

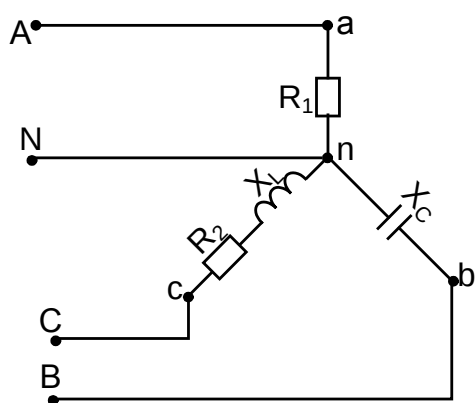


Рис. 3.9.

Таблица 3.4

Вариант	Данные к задаче 3.4				
	$U_{\Phi}, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$C, \text{мкФ}$	$L, \text{Гн}$
1	220	300	10	10	1
2	127	30	20	100	0,15
3	380	15	5	150	0,05
4	127	50	5	120	0,05
5	220	60	10	100	0,03
6	380	40	30	130	0,1
7	127	75	40	50	0,2
8	220	35	5	80	0,15
9	380	45	10	75	0,2
10	127	50	10	100	0,1
11	220	100	15	3	0,3
12	380	150	20	20	0,7
13	127	15	20	200	0,1
14	220	50	5	100	0,07
15	380	60	5	120	0,05
16	127	50	10	100	0,15
17	220	85	10	60	0,3
18	380	40	20	75	0,2
19	127	55	30	85	0,3
20	220	100	30	50	0,2

Задача 3.5

Несимметричная нагрузка, соединенная треугольником и включенная в трехфазную сеть переменного тока (рис 3.8). Частота тока 50 Гц. Линейное напряжение U , сопротивление резистора R , емкость конденсатора C и индуктивность катушки L известны. Рассчитать фазные токи. Построить векторную диаграмму токов и по ней определить линейные токи.

Таблица 3.5

Вариант	Данные к задаче 3.5			
	$U_L, В$	$R, Ом$	$C, мкФ$	$L, Гн$
1	220	50	100	0,04
2	380	20	120	0,05
3	660	300	15	2,0
4	220	80	40	0,4
5	380	60	100	0,04
6	660	30	100	0,2
7	220	75	50	0,15
8	380	120	40	0,3
9	660	35	75	0,2
10	220	55	90	0,1
11	380	40	60	0,12
12	660	10	220	0,2
13	220	150	30	2,0
14	380	100	40	0,5
15	660	30	150	0,03
16	220	60	60	0,3
17	380	80	45	0,2
18	660	60	80	0,15
19	220	70	35	0,4
20	380	10	250	0,03

Задача 3.6

Четырехпроводная трехфазная цепь соединяет генератор и несимметричную чисто активную трехфазную нагрузку, соединенную звездой. Сопротивление фаз нагрузки R_1, R_2, R_3 . Нейтральный провод имеет сопротивление R_0 . Сопротивление линейных проводов нулевое. Фазное напряжение генератора U_ϕ . Найти напряжение смещения нейтрали, используя метод узлового напряжения. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений.

Таблица 3.6

Вариант	Данные к задаче 3.6				
	$U_{\Phi}, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_0, \text{Ом}$
1	220	10	20	30	1
2	380	15	10	5	0,5
3	127	25	30	35	1,5
4	220	5	8	12	0,4
5	380	16	23	14	0,2
6	127	30	6	16	0,8
7	220	12	40	14	0,2
8	380	25	11	16	1,6
9	127	40	14	8	0,4
10	220	6	6	20	0,7
11	380	8	40	6	0,3
12	127	55	80	15	3,0
13	220	14	22	24	2,4
14	380	28	18	32	1,8
15	127	13	9	7	0,9
16	220	9	8	15	0,2
17	380	14	26	28	1,1
18	127	9	5	4	0,3
19	220	34	18	15	0,7
20	380	22	8	14	1,2

Задача 3.7

К сети переменного тока подсоединены параллельно три приемника энергии с активной мощностью P_1 , P_2 , P_3 и коэффициентами мощности $\cos\varphi_1$, $\cos\varphi_2$, $\cos\varphi_3$. Первый и третий приемники имеют активно-индуктивный характер, а второй – активно-емкостный. Рассчитать активную, реактивную и полную мощности сети, а также общий коэффициент мощности.

Таблица 3.7.

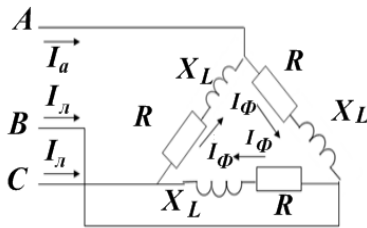
Вариант	Данные к задаче 3.7					
	P_1 , кВт	$\cos \varphi_1$	P_2 , кВт	$\cos \varphi_2$	P_3 , кВт	$\cos \varphi_3$
1	8	0,65	3	0,9	14	0,75
2	15	0,8	10	0,2	3	0,6
3	6	0,5	4	0,3	12	0,1
4	5	0,9	6	0,1	8	0,8
5	6	0,2	4	0,8	12	0,6
6	10	0,3	7	0,5	4	0,9
7	22	0,7	8	0,2	9	0,6
8	18	0,9	9	0,3	14	0,7
9	35	0,7	15	0,8	24	0,6
10	11	0,5	20	0,9	16	0,4
11	40	0,6	16	0,05	18	0,9
12	8	0,8	10	0,5	14	0,8
13	14	0,6	9	0,8	8	0,6
14	23	0,5	12	0,3	18	0,8
15	14	0,75	10	0,5	45	0,7
16	28	0,4	6	0,02	9	0,5
17	22	0,9	8	0,95	16	0,1
18	7	0,6	12	0,8	14	0,9
19	18	0,9	16	0,5	7	0,3
20	24	0,15	6	0,1	45	0,6

Тестовые задания для самоконтроля
Тема: Трехфазные электрические цепи
Тест 3.1

№1. Каковы соотношения линейных и фазных напряжений при соединении потребителя звездой?

1. $U_a=U_{ab}$; $U_b=U_{bc}$; $U_c=U_{ca}$;
2. $U_a=\sqrt{3} \cdot U_{ab}$; $U_b=\sqrt{3} \cdot U_{bc}$; $U_c=\sqrt{3} \cdot U_{ca}$;
3. $\sqrt{3} \cdot U_a=U_{ab}$; $\sqrt{3} \cdot U_b=U_{bc}$; $\sqrt{3} \cdot U_c=U_{ca}$.

№2. Какой вид нагрузки данного приемного устройства, если сопротивления фаз равны?

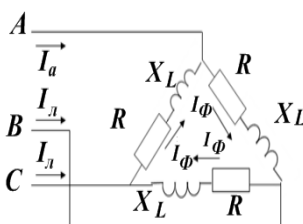


1. несимметричный;
2. неоднородный;
3. симметричный;
4. симметричный неоднородный.

№ 3. Полная потребляемая мощность нагрузки трехфазной цепи $S=14\text{кВА}$, реактивная $Q=9,5\text{ кВАр}$. Чему равен коэффициент мощности нагрузки?

1. $\cos \varphi = 0,8$;
2. $\cos \varphi = 0,73$;
3. $\cos \varphi = 0,68$;
4. $\cos \varphi = 0,4$.
5. нет правильных ответов

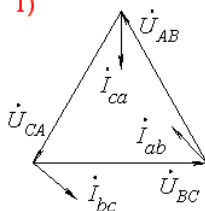
№ 4. Для данной схемы определить линейные и фазные токи, если $U_{\text{л}}=380\text{В}$, сопротивления приемника $R = 4\text{ Ом}$, $X_L = 3\text{ Ом}$.



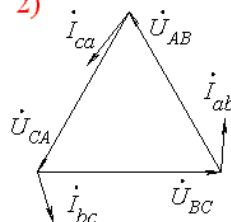
1. $I_{\phi} = 81\text{ A}$, $I_{\text{л}} = 81\sqrt{3}\text{ A}$;
2. $I_{\phi} = 76\text{ A}$, $I_{\text{л}} = 55\text{ A}$;
3. $I_{\phi} = 76\text{ A}$, $I_{\text{л}} = 76\sqrt{3}\text{ A}$;
4. $I_{\phi} = 44\text{ A}$, $I_{\text{л}} = 44\sqrt{3}\text{ A}$.

№5 Симметричный активно-индуктивный потребитель соединен треугольником. Какая векторная диаграмма справедлива?

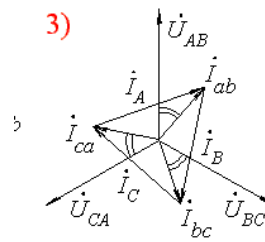
1)



2)



3)



Тест 3.2

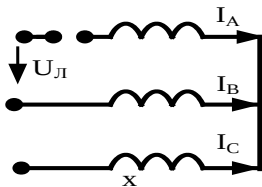
№1. Комплексное напряжение фазы А трехфазного генератора $U_A = 220V$
Напряжение U_{CA} равно

1. $\dot{U}_{CA} = 380 \cdot e^{j150} B$;
2. $\dot{U}_{CA} = 220 \cdot e^{j120} B$;
3. $\dot{U}_{CA} = 380 \cdot e^{j30} B$;
4. $\dot{U}_{CA} = 380 \cdot e^{-j90} B$.

№2. Запишите формулу полной мощности трехфазной цепи, если известны значения активной и реактивной мощностей.

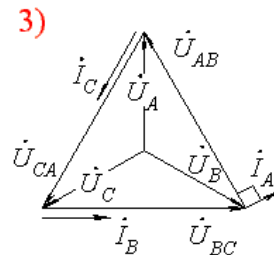
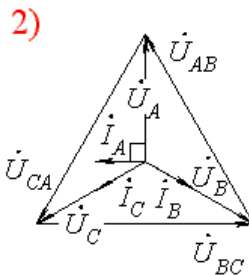
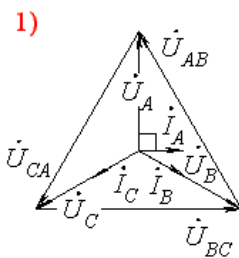
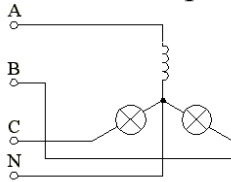
1. $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$;
2. $S = P + Q$;
3. $S = U \cdot I$.

№3. Определить ток I_B при обрыве фазы А. Дано: $U_{\text{л}} = 200 B$, $X = 20 \text{ Ом}$



1. 5 A;
2. 10 A;
3. 15 A;
4. 20 A.

№ 4 Какая векторная диаграмма соответствует данной схеме?



№5. Каково назначение нейтрального провода в трехфазной сети?

1. Для выравнивания фазных напряжений при симметричной нагрузке;
2. Для выравнивания фазных токов при несимметричной нагрузке;
3. Для выравнивания фазных напряжений при несимметричной нагрузке;
4. Для выравнивания линейных напряжений при несимметричной нагрузке.

4 Трансформаторы

4.1 Однофазные трансформаторы

Трансформатором называют статистический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при неизменной частоте.

Действующее значение электродвижущих сил наводимых в первичной и во вторичной обмотках, определяются по формулам

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m, \quad (4.1)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_m, \quad (4.2)$$

где E_1 и E_2 – ЭДС первичной и вторичной обмоток, В;

f – частота переменного тока, Гц;

Φ_m – амплитудное значение магнитного потока, Вб;

w_1 и w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток.

Отношение ЭДС обмоток, равное отношению чисел витков обмоток, называется коэффициентом трансформации

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (4.3)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора при номинальной нагрузке определяется отношением активных мощностей на выходе и входе трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{к.з} + P_{х.х}}, \quad (4.4)$$

где P_2 – активная мощность, потребляемая нагрузкой трансформатора, Вт;

P_1 – активная мощность, поступающая в первичную обмотку из сети, Вт;

$P_{к.з}$ и $P_{х.х}$ – потери мощности при коротком замыкании и при холостом ходе, Вт.

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{\text{х.х}} + \beta^2 \cdot P_{\text{к.з}}}, \quad (4.5)$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}} = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}}$ - коэффициент нагрузки;

$I_1, I_{1\text{ном}}$ - ток в первичной обмотке трансформатора и его номинальное значение, А;

$I_2, I_{2\text{ном}}$ - ток во вторичной обмотке трансформатора и его номинальное значение, А;

$S_{\text{ном}} = U_{1\text{нно}} \cdot I_{1\text{ном}}$ - полная мощность, потребляемая трансформатором при номинальной нагрузке, В·А;

$\cos \varphi_2$ - коэффициент мощности вторичной обмотки.

Потери холостого хода

$$P_{\text{х.х}} = I_{\text{х.х}} \cdot U_1 \cos \varphi_1, \quad (4.6)$$

где U_1 - напряжение первичной обмотки, В;

$I_{\text{х.х}}$ - ток холостого хода трансформатора, А;

$\cos \varphi_1$ - сдвиг фаз между током и напряжением на первичной обмотке.

Потери холостого хода расходуются на нагрев стали, то есть $P_{\text{х.х}} = P_{\text{с}}$.

Потери короткого замыкания

$$P_{\text{к.з}} = I_{1\text{ном}} \cdot U_{\text{к.з}} \cdot \cos \varphi_{\text{к}} = I_{1\text{нно}}^2 \cdot R_{\text{к.з}}, \quad (4.7)$$

где $U_{\text{к.з}}$ - напряжение короткого замыкания, В;

$R_{\text{к.з}}$ - сопротивление при коротком замыкании, Ом.

4.2 Трехфазные трансформаторы

Соотношения между линейными и фазными значениями токов и напряжений

а) при соединении в звезду

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}, \quad (4.8)$$

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}; \quad (4.9)$$

б) при соединении треугольником

$$U_{\Delta} = U_{\phi}, \quad (4.10)$$

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi}. \quad (4.11)$$

Мощность независимо от схемы соединения определяется по формулам

1) активная

$$P = 3P_{\phi} = 3 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta} \cdot I_{\Delta} \cdot \cos \varphi, \quad (4.12)$$

2) реактивная

$$Q = 3Q_{\phi} = 3 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta} \cdot I_{\Delta} \cdot \sin \varphi, \quad (4.13)$$

3) полная

$$S = 3S_{\phi} = 3 \cdot I_{\phi} \cdot U_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta} \cdot I_{\Delta}, \quad (4.14)$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (4.15)$$

4.3 Измерительные трансформаторы

Действительный коэффициент трансформации измерительных трансформаторов определяют по формулам

для трансформатора тока

$$K_I = \frac{I_1}{I_2}, \quad (4.16)$$

для трансформатора напряжения

$$K_U = \frac{U_1}{U_2}, \quad (4.17)$$

где I_1, I_2, U_1, U_2 — действительные значения первичных и вторичных токов и напряжений.

ПРИМЕР 4.

Дано: трехфазный трансформатор имеет следующие **данные:** номинальная мощность - $S_{ном} = 100 \text{ кВА}$; номинальное напряжение на зажимах первичных обмоток - $U_{1ном} = 660 \text{ В}$; номинальное напряжение на зажимах

вторичных обмоток - $U_{2ном} = 230 \text{ В}$; потери мощности в стали трансформатора - $P_{ст} = 500 \text{ Вт}$; потери мощности в обмотках при номинальном токе в них - $P_{о.ном} = 1500 \text{ Вт}$. Первичные и вторичные обмотки трансформатора соединены в «звезду». От трансформатора потребляется активная мощность $P_2 = 60 \text{ кВт}$ при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Найти:

- 1) линейный коэффициент трансформации - K_T ;
- 2) номинальные токи в первичных и вторичных обмотках трансформатора - $I_{1ном}, I_{2ном}$;
- 3) коэффициент нагрузки - $K_{нг}$;
- 4) ток в первичных и вторичных обмотках трансформатора при фактической нагрузке - I_1, I_2 ;
- 5) суммарные потери мощности при номинальной нагрузке трансформатора - $\sum P_{ном}$;
- 6) суммарные потери мощности при фактической нагрузке трансформатора - $\sum P$;
- 7) коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке трансформатора - $\eta_{ном}$;
- 8) коэффициент полезного действия при фактической нагрузке трансформатора - η .

Решение

1. Линейный коэффициент трансформации $K_T = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{660}{230} = 2,87$.

2. Номинальные токи в обмотках трансформатора:

- в первичных обмотках $I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{1ном}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 660} = 87,5 \text{ А}$;

- во вторичных обмотках $I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{2ном}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230} = 251 \text{ А}$.

$$3. \text{ Коэффициент нагрузки } \beta = \frac{P_2}{S_{ном} \cdot \cos \varphi_2} = \frac{60}{100 \cdot 0,8} = 0,75.$$

4. Токи в обмотках трансформатора при фактической нагрузке:

$$- \text{ в первичных обмотках } I_1 = \beta \cdot I_{1ном} = 0,75 \cdot 87,5 = 65,63 \text{ A};$$

$$- \text{ во вторичных обмотках } I_2 = \beta \cdot I_{2ном} = 0,75 \cdot 251 = 188 \text{ A}.$$

5. Суммарные потери мощности при номинальной нагрузке трансформатора $\sum P_{ном} = P_{ст} + P_{о.ном} = 500 + 1500 = 2000 \text{ Вт}.$

6. Суммарные потери мощности при фактической нагрузке трансформатора $\sum P = P_{ст} + \beta^2 \cdot P_{о.ном} = 500 + 0,75^2 \cdot 1500 = 1344 \text{ Вт},$

где $\beta^2 \cdot P_{о.ном}$ - потери мощности в обмотках трансформатора при фактической нагрузке.

7. Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке трансформатора

$$\eta_{ном} = \frac{P_{2ном} \cdot 100\%}{P_{2ном} + \sum P_{ном}} = \frac{S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 \cdot 100\%}{S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + P_{ст} + P_{о.ном}} = \frac{100 \cdot 0,8 \cdot 100\%}{100 \cdot 0,8 + 0,5 + 1,5} = 97,56\%.$$

8. Коэффициент полезного действия при фактической нагрузке трансформатора

$$\eta_{ном} = \frac{P_2 \cdot 100\%}{P_2 + \sum P} = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 \cdot 100\%}{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + P_{ст} + \beta^2 P_{о.ном}} = \frac{0,75 \cdot 100 \cdot 0,8 \cdot 100\%}{0,75 \cdot 100 \cdot 0,8 + 0,5 + 0,75^2 \cdot 1,5} = 97,8\%.$$

ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 4.1

Определить коэффициент трансформации трансформатора, число витков первичной обмотки трансформатора w_1 , номинальные токи первичной и вторичной обмотки однофазного трансформатора при данных значениях мощности однофазного трансформатора S_n , напряжения первичной U_1 и вторичной U_2 обмоток, количества витков вторичной обмотки однофазного трансформатора w_2 .

Таблица 4.1.

Вариант	Данные к задаче 4.1			
	$S_{\text{ном}}, \text{ВА}$	$U_{1\text{ном}}, \text{В}$	$U_{2\text{ном}}, \text{В}$	w_2
1	50	220	36	50
2	60	127	24	55
3	70	220	12	60
4	40	220	48	65
5	35	127	24	70
6	45	127	12	75
7	55	127	36	80
8	65	220	24	85
9	75	127	36	90
10	80	127	12	95
11	70	127	10	100
12	60	220	12	45
13	50	127	18	40
14	40	127	24	50
15	45	127	36	55
16	55	220	24	60
17	65	127	12	65
18	75	220	6	70
19	60	127	10	75
20	50	127	12	80

Задача 4.2

Для однофазного трансформатора мощностью $S_{\text{ном}}$ (кВ·А), напряжением 10/0,38 кВ известны потери холостого хода $P_{\text{х.х}}$ и потери короткого замыкания $P_{\text{к.з}}$ при номинальной нагрузке, ток холостого хода $I_{\text{х.х}}$ в процентах от номинального, напряжение короткого замыкания $U_{\text{к.з}}$ в процентах от номинального. Определить активные и реактивные сопротивления обмоток, считая, что сопротивления первичной и вторичной обмоток равны. Вычислить коэффициент мощности при холостом ходе трансформатора.

Таблица 4.2

Вариант	Данные к задаче 4.2				
	$S_{ном}$ кВ·А	$P_{х,х}$ кВт	$P_{к,з}$ кВт	$I_{х,х}$ %	$U_{к,з}$ %
1	4650	12	37,4	2,5	7
2	5500	14	43,6	2,5	7
3	6100	16	48,8	3	8
4	7050	18	56	3	8
5	7650	20	62,2	3,5	7
6	8600	22	68,5	3,5	7
7	9400	24	74,8	2,5	8
8	10000	26	81	2,5	8
9	10900	28	87	3,0	7
10	11600	30	93,5	3,5	7

Задача 4.3

К трехфазному трансформатору напряжением $U_{1ном}/U_{2ном}$ (В) подключены осветительные электроприемники ($\cos\varphi=1$) общей мощностью P . Трансформатор соединен по схеме «звезда-звезда», КПД трансформатора η . Определить первичные и вторичные токи трансформатора.

Таблица 4.3

Вариант	Данные к задаче 4.3			
	$U_{1ном}$, В	$U_{2ном}$, В	P , кВт	η
1	6600	220	60	0,8
2	10000	220	80	0,85
3	6000	380	120	0,9
4	10000	380	150	0,8
5	6000	660	20	0,85
6	10000	660	250	0,9
7	6000	220	70	0,8
8	10000	220	80	0,85
9	6000	380	45	0,9
10	10000	380	100	0,8

Задача 4.4

Трехфазный трансформатор характеризуется следующими номинальными величинами: мощность $S_{\text{ном}}$; высшее линейное напряжение $U_{1\text{ном}}$; низшее линейное напряжение $U_{2\text{ном}}$. Схема соединения обмоток трансформатора Y/Y. Мощность потерь холостого хода $P_{\text{х.х}}$ (при первичном напряжении, равном номинальному); мощность потерь короткого замыкания $P_{\text{к.з}}$ (при токах в обмотках, равных номинальным).

Определить:

- 1) коэффициент трансформации;
- 2) фазные напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе;
- 3) номинальные токи в обмотках трансформатора;
- 4) активное сопротивление фазы первичной и вторичной обмоток;
- 5) КПД трансформатора при $\cos\varphi_2=0,8$ и значениях коэффициента нагрузки 0,25; 0,5; 0,75.

Указания. Принять, что в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и вторичной обмотками.

Таблица 4.4

Вариант	Данные к задаче 4.4				
	$S_{\text{ном}}$ кВ·А	$U_{1\text{ном}}$, В	$U_{2\text{ном}}$, В	$P_{\text{х.х}}$, Вт	$P_{\text{к.з}}$, Вт
1	2	3	4	5	6
1	20	6	230	180	600
2	20	10	400	220	600
3	30	6	230	250	850
4	30	10	400	300	850
5	50	6	525	350	1325
6	50	10	400	440	1325
7	100	6	525	600	2400
8	100	10	400	730	2400
9	180	6	400	1000	4000
10	180	10	525	1200	4100

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6
11	40	12	230	180	600
12	40	20	400	220	600
13	60	12	230	250	850
14	60	20	400	300	850
15	100	12	525	350	1325
16	100	20	400	440	1325
17	200	12	525	600	2400
18	200	20	400	730	2400
19	360	12	400	1000	4000
20	360	20	525	1200	4100

Задача 4.5

Трехфазный трансформатор характеризуется следующими номинальными величинами: мощность $S_{\text{ном}}$; выше (первичное) линейное напряжение $U_{1\text{н}}$; низшее (вторичное) линейное напряжение $U_{2\text{ном}}$; КПД $\eta_{\text{ном}}$. Процентное значение напряжения короткого замыкания $U_{\text{к.з}} \%$; мощность потерь короткого замыкания $P_{\text{к.з}}$ (при токах в обмотках, равных номинальным). Схема соединения обмоток Y/Δ .

Определить:

- 1) номинальные токи в обмотках трансформатора;
- 2) коэффициент трансформации фазных напряжений;
- 3) мощность потерь холостого хода при $\cos\varphi_2=1,0$;
- 4) активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания;
- 5) процентное изменение вторичного напряжения при номинальной нагрузке и значениях угла φ_2 в пределах от -90 до $+90^\circ$;
- 6) КПД трансформатора при коэффициенте нагрузки $\beta=0,25$; $0,5$ и $\cos\varphi_2=0,8$.
- 7) построить в общей системе координатных осей кривые $U_2(I_2)$ при $\cos\varphi_2=0,8$ и $\eta(I_2)$ при $\cos\varphi_2=0,8$.

Таблица 4.5

Вариант	Данные к задаче 4.5					
	$S_{\text{ном}}$ кВ·А	$U_{1\text{ном}},$ В	$U_{2\text{ном}},$ В	$P_{\text{х.х}},$ Вт	$P_{\text{к.з}},$ Вт	$U_{\text{к.з}},$ В
1	20	6	400	96,2	600	5,5
2	20	10	400	96,0	600	5,5
3	30	6	400	96,5	850	5,5
4	30	10	400	93,3	850	5,5
5	50	6	525	96,7	1325	5,5
6	50	10	400	96,0	1325	5,5
7	100	6	525	98,0	2400	5,5
8	100	10	400	97,0	2400	5,5
9	180	6	525	97,3	4000	5,5
10	180	10	525	97,0	4100	5,5
11	40	12	400	96,2	600	5,5
12	40	20	400	96,0	600	5,5
13	60	12	400	96,5	850	5,5
14	60	20	400	93,3	850	5,5
15	100	12	525	96,7	1325	5,5
16	100	20	400	96,0	1325	5,5
17	200	12	525	98,0	2400	5,5
18	200	20	400	97,0	2400	5,5
19	360	12	525	97,3	4000	5,5
20	360	20	525	97,0	4100	5,5

Задача 4.6

Потребители электрической энергии питаются от трехфазного двухобмоточного понижающего трансформатора с номинальной мощностью $S_{1\text{ном}}$ при номинальных первичном $U_{1\text{ном}}$ и вторичном $U_{2\text{ном}}$ линейных напряжениях с номинальной частотой $f=50$ Гц. Технические данные трансформатора: потери мощности при холостом ходе P_0 , потери мощности при коротком замыкании $P_{\text{к.з}}$, напряжение короткого замыкания $U_{\text{к.з}} \%$ при токах в обмотках $I_{1\text{ном}}$ и $I_{2\text{ном}}$, равных номинальным. Способ соединения обмоток трансформатора «звезда».

Определить: 1) коэффициент трансформации; 2) коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}}$ при номинальной нагрузке $\cos\varphi_2=0,8$; 3) токи в первичной $I_{1\text{ном}}$ и во вторичной $I_{2\text{ном}}$ обмотках; 4) фазные первичное $U_{1\text{х.х}}$ и вторичное

$U_{2x.x}$ напряжения при холостом ходе; 5) вторичное напряжение U_2 при токе нагрузки $I_2=2I_{2ном}$ и $\cos \varphi_2=0,7$.

Таблица 4.6

Вари- ант	Данные к задаче 4.6						
	Тип	$S_{1ном}$ кВ·А	$U_{1ном}$, кВ	$U_{2ном}$, кВ	$P_{x.x}$, кВт	$P_{к.з}$, кВт	$U_{к.з}$, %
1	ТМ-25/6-10	25	6	0,23	0,13	0,6	4,5
2	ТМ-25/6-10	25	10	0,40	0,13	0,6	4,5
3	ТМ-40/6-10	40	6	0,23	0,175	0,88	4,5
4	ТМ-40/6-10	40	10	0,40	0,175	0,88	4,5
5	ТМ-63/6-10	63	6	0,23	0,24	1,28	4,5
6	ТМ-63/6-10	63	10	0,40	0,24	1,28	4,5
7	ТМ-100/6-10	100	6	0,23	0,33	1,97	6,5
8	ТМ-100/6-10	100	10	0,40	0,33	1,97	6,5
9	ТМ-160/6-10	160	6	0,23	0,51	2,65	4,5
10	ТМ-160/6-10	160	10	0,40	0,51	2,65	4,5
11	ТМ-250/6-10	250	6	0,23	0,74	3,7	4,5
12	ТМ-250/6-10	250	10	0,40	0,74	3,7	4,5
13	ТМ-400/6-10	400	6	0,23	0,93	5,5	4,5
14	ТМ-400/6-10	400	10	0,40	0,93	5,5	4,5
15	ТМ-630/6-10	630	6	0,23	1,31	7,6	5,5
16	ТМ-630/6-10	630	10	0,40	1,31	7,6	5,5
17	ТМ-1000/6-10	1000	6	0,23	2,45	12,2	5,5
18	ТМ-1000/6-10	1000	10	0,40	2,45	12,2	5,5
19	ТМ-1600/6-10	1600	6	0,23	3,3	18,0	5,5
20	ТМ-1600/6-10	1600	10	0,40	3,3	18,0	5,5
21	ТС3-160/10	160	6	0,23	0,7	2,7	5,5
22	ТС3-160/10	160	10	0,40	0,7	2,7	5,5
23	ТС3-250/10	250	6	0,23	1,0	3,8	5,5
24	ТС3-250/10	250	10	0,40	1,0	3,8	5,5
25	ТС3-400/10	400	6	0,23	1,3	5,4	5,5
26	ТС3-630/10	630	10	0,40	2,0	7,3	5,5
27	ТС3-1000/10	1000	6	0,23	3,0	11,2	5,5
28	ТМ-20/6-10	20	10	0,40	0,18	0,6	5,5
29	ТМ-20/6-10	20	6	0,23	0,22	0,6	6,5
30	ТМ-30/6-10	30	10	0,40	0,25	0,85	5,5

Тестовые задания для самоконтроля

Тема: Трансформаторы

Тест 4.1

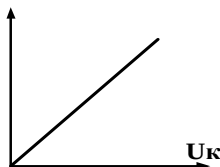
№1. Для чего предназначен трансформатор?

1. для потребления электрической энергии;
2. для передачи и распределения электрической энергии;
3. для преобразования механической энергии в электрическую;
4. для преобразования электрической энергии в механическую при постоянном напряжении.

№ 2. Трехфазный трансформатор имеет число витков на фазу в первичной обмотке $W_1 = 2000$, вторичной $W_2 = 200$, подключен к трехфазной сети с линейным напряжением 380В. Найти линейный коэффициент трансформации при соединении обмоток Y/Y.

- | | |
|--------------------|-----------------|
| 1. $K_L = 17,32$; | 4. $K_L = 20$; |
| 2. $K_L = 10$; | 5. $K_L = 38$. |
| 3. $K_L = 22$; | |

№ 3. Изображена характеристика короткого замыкания трансформатора. Какая величина не обозначена?



- | | |
|-----------------------|------------|
| 1. P_k ; | 4. I_k ; |
| 2. U_k ; | 5. U_2 . |
| 3. $\cos \varphi_k$; | |

№ 4. Трансформатор потребляет из сети активную мощность $P_1 = 5000$ Вт, КПД трансформатора $\eta = 85\%$. Определите суммарные потери в трансформаторе ΣP .

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| 1. $\Sigma P = 500$ Вт; | 3. $\Sigma P = 250$ Вт; |
| 2. $\Sigma P = 1000$ Вт; | 4. $\Sigma P = 750$ Вт. |

№ 5. Фундаментальное уравнение, описывающее магнитное поле, это.....

1. Уравнение Максвелла;
2. Уравнения, составленные по законам Кирхгофа;
3. закон Джоуля - Ленца

Тест 4.2

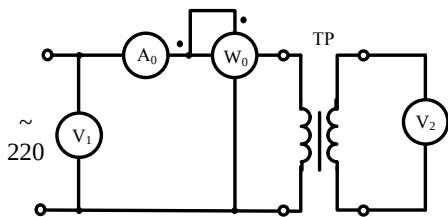
№1. Сердечник трансформатора собирают из отдельных изолированных друг от друга листов электротехнической стали

1. уменьшить потери на гистерезис;
2. уменьшить потери на вихревые токи в сердечнике;
3. уменьшить потери в обмотках;
4. увеличения магнитного потока.

№ 2. Найдите действующее значение Э.Д.С. в обмотках трансформатора, если $\Phi_m = 0,02$ Вб, частота питающей сети $f = 50$ Гц, $W_1=100$ витков, $W_2=50$ витков.

1. $E_1 = 444$ В; $E_2 = 222$ В;
2. $E_1 = 444$ В; $E_2 = 0$;
3. $E_1 = 44,4$ В; $E_2 = 22,2$ В;
4. $E_1 = 4,44$ В; $E_2 = 2,22$ В.

№ 3. Трансформатор работает в режиме.....



1. холостого хода;
2. рабочий режим;
3. номинальный;
4. короткого замыкания.

№ 4. величиной, имеющей размерность Тл, является.....

1. магнитный поток;
2. магнитная индукция;
3. напряженность магнитного поля;
4. напряженность электрического поля.

№ 5. На какую группу не делят трансформаторы?

1. понижающие;
2. повышающие;
3. силовые;
4. нет правильного ответа.

5 Электрические машины

5.1 Машины постоянного тока

Электродвижущая сила обмоток якоря машины постоянного тока

$$E = c_E \cdot \Phi \cdot n = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a} \cdot \Phi \cdot n, \quad (5.1)$$

где c_E - электрическая постоянная, зависящая от конструктивных данных машин;

Φ – магнитный поток, Вб;

n - частота вращения якоря, об/мин;

p – число пар полюсов машины;

N - число активных проводников обмотки якоря;

a – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Напряжение на зажимах генератора

$$U = E - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}. \quad (5.2)$$

Напряжение на зажимах двигателя

$$U = E + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}, \quad (5.3)$$

где E – ЭДС обмоток якоря, В;

$I_{\text{я}}$ – ток якоря, А;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление цепи якоря, Ом.

Полезная мощность, отдаваемая генератором,

$$P_2 = U \cdot I. \quad (5.4)$$

Мощность, подводимая к двигателю,

$$P_1 = U \cdot I, \quad (5.5)$$

где U – напряжение на зажимах, В;

I – ток внешней цепи, А.

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E \cdot I_{\text{я}}. \quad (5.6)$$

Ток якоря в генераторах с самовозбуждением

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{в}}. \quad (5.7)$$

Ток двигателя с параллельной обмоткой возбуждения

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}, \quad (5.8)$$

где $I_{\text{в}}$ – ток в обмотках возбуждения, А.

Ток якоря двигателя

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{U - c_E \cdot \Phi \cdot n}{R_{\text{я}}}. \quad (5.9)$$

Ток в цепи возбуждения двигателя

$$I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{вО}}} = \frac{U}{R_{\text{в}} + R_{\text{р}}}, \quad (5.10)$$

где $R_{\text{вО}}$ – общее сопротивление цепи возбуждения, Ом;

$R_{\text{в}}$ – сопротивление возбуждения, Ом;

$R_{\text{р}}$ – сопротивление реостата в цепи возбуждения, Ом.

Сопротивление пускового реостата

$$R_{\text{р}} = \frac{U}{I_{\text{я.ном}}} - R_{\text{я}}, \quad (5.11)$$

где $I_{\text{я.ном}}$ – номинальный ток якоря, А.

Частота вращения якоря двигателя

$$n = \frac{E_{\text{я}}}{c_E \Phi} = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_E \Phi}. \quad (5.12)$$

Частота вращения идеального холостого хода двигателя

$$n = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{я.ном}} \cdot R_{\text{я}}}. \quad (5.13)$$

Уравнение механической характеристики двигателя

$$n = \frac{U}{c_E \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R_{\text{я}}}{c_E \cdot c_M \cdot \Phi^2}, \quad (5.14)$$

где M – вращающий момент, развиваемый двигателем, Н·м;

c_M – постоянная двигателя, связывающая конструктивные особенности двигателя и момент двигателя, $c_M = 9,55 \cdot c_E$.

Вращающий момент двигателя

$$M = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} = c_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (5.15)$$

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_2}{n}, \quad (5.16)$$

где P_2 – мощность на валу двигателя, Вт.

Уравнение моментов генератора

$$M_{\Gamma} = M_{\chi} + M_{\text{ЭМ}} = M_{\chi} + c_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}, \quad (5.17)$$

где M_{χ} – момент холостого хода, Н·м;

$M_{\text{ЭМ}}$ – электромагнитный тормозной момент, Н·м.

Кратность по току

$$K_I = \frac{I_{\Pi}}{I_{\text{ном}}}, \quad (5.18)$$

где I_{Π} – пусковой ток двигателя, А;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток двигателя, А.

КПД генератора

$$\eta = \frac{P_{2\Gamma}}{P_1} = \frac{P_{2\Gamma}}{P_{2\Gamma} + \sum P} = \frac{U \cdot I}{U \cdot I + \sum P} = 1 - \frac{\sum P}{U \cdot I + \sum P}, \quad (5.19)$$

где $P_{2\Gamma}$ – мощность на зажимах генератора, Вт;

P_1 – подводимая механическая мощность, Вт;

U – напряжение на зажимах генератора, В;

I – ток нагрузки, А.

КПД двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{U \cdot I - \sum P}{U \cdot I} = 1 - \frac{\sum P}{U \cdot I}, \quad (5.20)$$

где P_2 – мощность на валу двигателя, Вт;

P_1 – подводимая мощность, Вт;

$\sum P$ – сумма потерь, Вт.

Сумма потерь определяется по формуле

$$\sum P = P_{\chi} + P_{\text{Э}} = P_{\text{М}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\text{Д}} + P_{\text{ЭВ}} + P_{\text{ЭЯ}} + P_{\text{ЩЭ}}, \quad (5.21)$$

где P_{χ} – потери при холостом ходе, Вт;

$P_{\text{Э}}$ – электрические потери, возникают при нагреве обмоток и щеточного контакта, Вт;

P_M – магнитные потери в сердечнике якоря, Вт;

P_{MEH} – потери механические, Вт;

P_D – потери добавочные, Вт (под добавочными потерями понимают трудно учитываемые потери, их принимают равными 1% от подводимой мощности двигателя);

$P_{ЭВ}$ – потери в обмотках возбуждения, включая регулировочный реостат, Вт;

$P_{ЭЯ}$ – потери в обмотках якоря, Вт;

$P_{ЭЩ}$ – потери электрические в щетках, Вт;

ПРИМЕР 5.

Дано: электродвигатель постоянного тока со смешанным возбуждением (рис. 5.1) рассчитан на номинальную мощность на валу $P_{2ном} = 2000 \text{ Вт}$; номинальное напряжение $U_{ном} = 27 \text{ В}$; частота вращения якоря $n_{ном} = 8000 \text{ об/мин}$. Двигатель потребляет из сети ток $I_{ном} = 100 \text{ А}$; сопротивление обмотки якоря, обмотки добавочных полюсов и последовательной обмотки возбуждения $\sum R = R_{Я} + R_{ДП} + R_{С} = 0,01443 \text{ Ом}$; сопротивление параллельной обмотки возбуждения $R_B = 6,75 \text{ Ом}$.

Примечание: $\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$

Найти:

- 1) потребляемую из сети мощность P_1 ;
- 2) номинальный коэффициент полезного действия двигателя $\eta_{ном}$;
- 3) полезный вращающий момент M ;
- 4) ток обмотки якоря $I_{Я}$;
- 5) противоЭДС в обмотке якоря E ;
- 6) электрические потери мощности $P_{Э}$;
- 7) суммарные потери мощности в двигателе $\sum P$;
- 8) добавочные потери мощности $P_{доб}$; 9) потери холостого хода P_x .

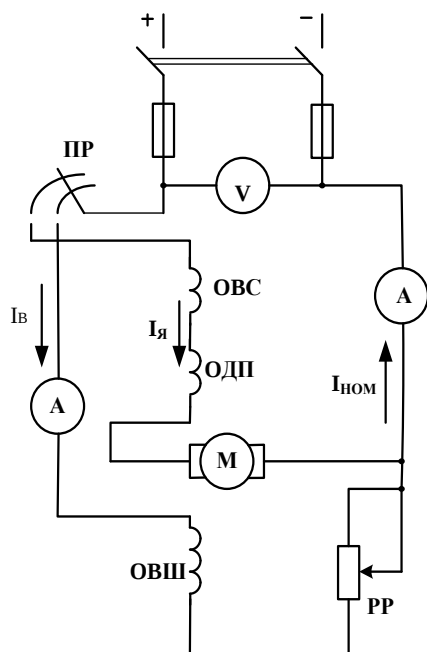


Рис 5.1.

Условные обозначения схемы

(рис. 5.1):

ПР – пусковой реостат;

РР – регулировочный реостат;

ОВШ – параллельная (шунтовая) обмотка возбуждения;

ОВС – последовательная (сериесная) обмотка возбуждения;

ОДП – обмотка добавочных полюсов.

Решение

1. Мощность, потребляемая двигателем из сети

$$P_1 = U_{ном} \cdot I_{ном} = 27 \cdot 100 = 2700 \text{ Вт.}$$

2. КПД двигателя $\eta_{ном} = \frac{P_{2ном}}{P_1} \cdot 100 \% = \frac{2000 \cdot 100 \%}{2700} = 74 \% .$

3. Полезный вращающий момент на валу двигателя

$$M = \frac{60 \cdot P_{2ном}}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{ном}} = \frac{60 \cdot 2000}{2 \pi \cdot 8000} = 2,38 \text{ Н·м.}$$

4. Ток параллельной обмотки возбуждения $I_{ВШ} = \frac{U_{ном}}{R_B} = \frac{27}{6,75} = 4 \text{ А.}$

5. Ток, протекающий через обмотку якоря, обмотку добавочных полюсов, последовательную обмотку возбуждения (все эти обмотки соединены последовательно) $I_{я} = I_{ном} - I_{ВШ} = 100 - 4 = 96 \text{ А.}$

6. ПротивоЭДС в обмотке якоря

$$E = U_{ном} - I_{я} \cdot (R_{я} + R_{ДП} + R_c) - \Delta U_{щ} = 27 - 96 \cdot 0,01443 - 2 = 23,61 \text{ В.}$$

7. Суммарные потери мощности двигателя

$$\sum P = P_1 - P_{2ном} = 2700 - 2000 = 700 \text{ Вт.}$$

8. Электрические потери мощности в двигателе

$$P_{\Sigma} = P_{\text{я}} + P_{\text{дп}} + P_{\text{с}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{ш}},$$

где а) потери мощности в якоре $P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}}$;

б) потери мощности в добавочных полюсах $P_{\text{дп}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{дп}}$;

в) потери мощности в последовательной обмотке возбуждения
 $P_{\text{с}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{с}}$;

г) потери мощности в переходном контакте щеток на коллекторе
 $P_{\text{щ}} = I_{\text{я}} \cdot \Delta U_{\text{щ}}$;

д) потери мощности в параллельной обмотке возбуждения
 $P_{\text{ш}} = I_{\text{вш}} \cdot U_{\text{ном}}$ или $P_{\text{ш}} = I_{\text{вш}}^2 \cdot R_{\text{ш}}$ или $P_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{R_{\text{ш}}}.$

Тогда электрические потери

$$P_{\Sigma} = I_{\text{я}}^2 (R_{\text{я}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{с}}) + \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_{\text{я}} + U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{вш}} = 96^2 \cdot 0,01443 + 2 \cdot 96 + 27 \cdot 4 = 433 \text{ Вт}$$

9. Добавочные потери мощности, возникающие в обмотке якоря, вызванные искажением магнитного поля реакцией якоря и полями, возникающими вокруг секций, в которых происходит коммутация
 $P_{\text{доб}} = 0,01 \cdot P_{2\text{ном}} = 0,01 \cdot 2000 = 20 \text{ Вт}$

10. Потери холостого хода, состоящие из потерь в стали и механических потерь $P_{\text{х}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = \sum P - (P_{\Sigma} + P_{\text{доб}}) = 700 - (433 + 20) = 247 \text{ Вт}$

ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 5.1

Электродвигатель постоянного тока с последовательным возбуждением характеризуется следующими номинальными величинами: напряжение на зажимах $U_{\text{ном}}$; мощность $P_{\text{ном}}$; частота вращения якоря $n_{\text{ном}}$. При номинальной нагрузке мощность потерь составляет (в процентах от мощности, потребляемой электродвигателем): в цепи якоря и дополнительных полюсов

$P_{\text{я}} = 4\%$; в обмотке возбуждения $P_{\text{в}} = 3\%$; мощность механических и магнитных потерь $P_{\text{м}} = 1,5\%$.

Определить: 1) ток $I_{\text{н}}$, потребляемый электродвигателем из сети при номинальной нагрузке;

2) номинальный момент $M_{\text{ном}}$ на валу электродвигателя;

3) частоту вращения якоря при значениях тока 0,25; 0,75; 1,25 $I_{\text{ном}}$;

4) суммарные потери и КПД электродвигателя при тех же значениях тока (принимая, что мощность механических и магнитных потерь изменяется пропорционально скорости вращения якоря);

5) момент на валу при тех же значениях тока. Построить механическую характеристику электродвигателя.

Зависимость $\Phi = f(I_{\text{в}})$, учесть что $I_{\text{в}} = I_{\text{я}}$

$I_{\text{в}}, \%$	0	20	40	60	80	100	120	150
$\Phi, \%$	5	45	73	88	95	100	103	107

Таблица 5.1

Вариант	Данные к задаче 5.1		
	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$
1	2	3	4
1	110	2	600
2	220	10	700
3	440	15	800
4	110	20	900
5	220	25	1000
6	440	30	600
7	110	35	700
8	220	40	800
9	440	45	900
10	220	50	1000
11	110	4	600
12	220	20	700
13	440	30	800
14	110	40	900
15	220	50	1000

Продолжение таблицы 5.1

16	440	60	600
17	110	70	700
18	220	80	800
19	440	90	900
20	220	100	1000

Задача 5.2

Электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением выполнен на номинальное напряжение 220В. Данные номинального режима электродвигателя: мощность $P_{н1}$; частота вращения якоря n_n ; КПД η_n . Ток в цепи возбуждения составляет I_B , % от номинального тока электродвигателя. Мощность потерь в цепи якоря при номинальной нагрузке составляет 50% от суммарной мощности потерь в электродвигателе.

Определить: 1) номинальный момент на валу электродвигателя; 2) ток I_n , потребляемый электродвигателем из сети при номинальной нагрузке; 3) токи в цепях возбуждения и якоря при номинальной нагрузке; 4) сопротивление в цепи якоря и цепи возбуждения; 5) мощность механических и магнитных потерь (принимая ее не зависящей от нагрузки); 6) суммарную мощность потерь и КПД электродвигателя при значениях тока 0,25; 0,5; 0,75 и $1,25I_n$; 7) момент на валу и частоту вращения якоря при тех же значениях тока. Построить в общей системе координат осей кривые $M=f(I_A)$, $n=f(I_A)$, $\eta=f(I_A)$, где I_A – ток в цепи якоря (соответственно значениям нагрузки, указанным выше).

Таблица 5.2

Вариант	Данные к задаче 5.2			
	P_n , кВт	n , об/мин	η_n , %	I_B , %
1	2,2	3000	80	3
2	3,2	3000	83	3
3	4,5	3000	84	3
4	6	3000	82	3
5	8	3000	83,5	3

Продолжение таблицы 5.2

6	14	1500	86,5	4
7	19	1500	83,7	2
8	25	1500	85,5	2
9	32	1500	83,9	2
10	42	1500	87,2	2
11	4,4	3000	80	3
12	6,4	3000	83	3
13	9,0	3000	84	3
14	12	3000	82	3
15	16	3000	83,5	3
16	28	1500	86,5	4
17	38	1500	83,7	2
18	50	1500	85,5	2
19	64	1500	83,9	2
20	84	1500	87,2	2

Задача 5.3

Электродвигатель постоянного тока серии п параллельного возбуждения характеризуется номинальными данными (таблица 5.4): напряжение питающей сети $U_{\text{ном}}$, мощностью на валу $P_{2\text{ном}}$, частота вращения якоря $n_{\text{ном}}$, ток $I_{\text{ном}}$. Сопротивление цепи якоря двигателя $R_{\text{я}} = 0,05 \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}}$ Ом. При расчетах током возбуждения $I_{\text{в}}$ электродвигателя пренебречь.

Определить: 1) КПД двигателя $\eta_{\text{ном}}$ при номинальной нагрузке; 2) сопротивление $R_{\text{пуск}}$ пускового реостата, ограничивающего ток при пуске электродвигателя до значения $I_{\text{пуск}} = a \cdot I_{\text{ном}}$; 3) добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$ в цепи якоря, при котором двигатель в режиме противовключения при моменте нагрузки, равном $b \cdot M_{\text{ном}}$, развивает частоту вращения $s \cdot n_{\text{ном}}$. Рассчитать и построить в единой системе координат искусственную и естественную механические характеристики $n=f(M)$ и зависимость тока от момента электродвигателя $I=f(M)$ в пределах от $M=2M$ до $M=-2M_{\text{ном}}$.

Таблица 5.3

Вари- ант	Данные к задаче 5.3						
	U _{ном} , В	P _{2ном} , кВт	n _{ном} , об/мин	I _{ном} , А	коэффициенты		
					а	б	с
1	110	1	1450	12	1,1	0,9	0,5
2	220	2,5	1000	14	1,1	1	0,5
3	220	2,5	1300	14,2	1,1	1	0,6
4	110	3,7	1000	42	1,2	1,2	0,6
5	220	4,5	1100	26	1,2	1,2	0,8
6	220	5,6	1000	30	1,2	1,4	0,8
7	110	5,8	800	68	1,3	1,4	1
8	220	9	900	48	1,3	1,5	0,5
9	220	12	685	64	1,4	1,5	0,6
10	220	16	700	34	1,5	1,6	0,6
11	220	23	600	120	1,6	1,6	0,6
12	220	33	650	168	1,7	1,6	0,7
13	220	46	580	230	1,8	1,8	0,7
14	220	75	520	375	1,9	1,8	0,7
15	220	100	475	500	2	1,8	0,8
16	110	1	1420	12	1,1	0,9	0,5
17	110	2,5	1000	14	1,1	0,9	0,5
18	110	2,5	1300	14,2	1,1	1	0,5
19	110	3,7	1000	42	1,2	1	0,6
20	110	4,5	1100	26	1,2	1,2	0,6
21	110	5,6	1000	30	1,2	1,2	0,6
22	110	5,8	800	68	1,3	1,4	0,7
23	110	9	900	48	1,3	1,4	0,7
24	110	12	685	64	1,4	1,5	0,7
25	110	16	700	34	1,4	1,5	0,7
26	110	23	600	120	1,5	1,6	0,8
27	110	33	650	168	1,5	1,6	0,8
28	110	46	580	230	1,6	1,8	0,8
29	110	75	520	374	1,6	1,8	0,9
30	110	100	475	500	1,7	1,8	0,9

Задача 5.4

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением характеризуется следующими номинальными величинами: напряжение $U_{\text{ном}}$; мощность $P_{\text{ном}}$. Мощность потерь в номинальном режиме в процентах от $P_{\text{ном}}$: в цепи якоря $P_{\text{я}}$, в цепи возбуждения.

Определить:

1) номинальный ток нагрузки $I_{\text{н}}$ генератора; 2) номинальный ток возбуждения $I_{\text{в}}$; 3) номинальный ток якоря $I_{\text{я}}$; 4) сопротивление цепи возбуждения при токе возбуждения, равном номинальному; 5) сопротивление обмотки возбуждения, равном номинальному; 6) сопротивление обмотки возбуждения, принимая, что при холостом ходе генератора и полностью выведенном реостате в цепи возбуждения ток в цепи составляет $1,5 \cdot I_{\text{в}}$;

7) значение сопротивления реостата, который должен быть введен в цепь возбуждения для тока, чтобы напряжение U_0 на зажимах якоря при холостом ходе стало равным напряжению $U_{\text{ном}}$.

Указание. Воспользоваться зависимостью $\Phi=f(I_{\text{в}})$, данной в задаче 5.1

Таблица 5.4

Вариант	Данные к задаче 5.4			
	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$P_{\text{я}}, \%$	$P_{\text{в}}, \%$
1	2	3	4	5
1	115	11	7,5	3
2	230	14	7,5	3
3	115	29	7	2
4	230	25	7	2
5	230	32	7	2
6	230	42	6,5	2
7	230	55	6	2
8	230	75	5,5	2
9	230	100	5	1,5
10	230	125	4,5	1,5

Продолжение таблицы 5.4

1	2	3	4	5
11	115	22	7,5	3
12	230	56	7,5	3
13	115	58	7	2
14	230	50	7	2
15	230	64	7	2
16	230	84	6,5	2
17	230	110	6	2
18	230	150	5,5	2
19	230	200	5	1,5
20	230	250	4,5	1,5

Задача 5.5

Электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением характеризуется следующими номинальными величинами: напряжение $U_{\text{ном}}$; мощность на валу $P_{\text{ном}}$; частота вращения якоря n_n , КПД η_n ; сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}}$; сопротивление цепи возбуждения $R_{\text{в}}$.

Определить:

- 1) частоту вращения якоря при холостом ходе;
- 2) частоту вращения якоря при номинальном моменте на валу двигателя и включении в цепь якоря добавочного сопротивления, равного $3 \cdot R_{\text{я}}$.
- 3) построить естественную и реостатную механические характеристики $n=f(M)$ электродвигателя.

Указание. Реакцией якоря и током холостого хода якоря пренебречь.

Таблица 5.6

Вариант	Данные к задаче 5.5					
	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$n_{\text{н}}, \text{об/мин}$	$\eta_{\text{н}}, \%$	$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	$R_{\text{в}}, \text{Ом}$
1	110	1,0	3000	77	1,2	220
2	110	1,5	3000	76	0,8	160
3	110	2,2	3000	80	0,48	110
4	110	3,2	3000	78,5	0,34	80
5	110	4,5	1500	80	0,23	70
6	220	6	1500	82,5	0,62	220
7	220	8	3000	83,5	0,44	110
8	220	11	1500	84	0,31	185
9	220	14	1500	86,5	0,21	135
10	220	19	1500	84,5	0,16	110
11	110	2,0	3000	77	1,2	220
12	110	3,0	3000	76	0,8	160
13	110	4,4	3000	80	0,48	110
14	110	6,4	3000	78,5	0,34	80
15	110	9,0	1500	80	0,23	70
16	220	12	1500	82,5	0,62	220
17	220	16	3000	83,5	0,44	110
18	220	22	1500	84	0,31	185
19	220	28	1500	86,5	0,21	135
20	220	36	1500	84,5	0,16	110

Тестовые задания для самоконтроля**Тема: Электрические машины постоянного тока****Тест 5.1**

№1. Как изменяется напряжение на зажимах генератора постоянного тока при увеличении нагрузки?

1. уменьшается;
2. увеличивается;
3. не изменяется.
4. сначала увеличивается, затем уменьшается

№2. Какое правило используется для определения направления силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?

1. правило левой руки;
2. правило правой руки;
3. правило буравчика;
4. правило обратимости.

№3. Определите вращающий (электромагнитный) момент двигателя, если при скорости 100 рад/с в обмотке якоря вырабатывается противо-ЭДС 100В, а двигатель потребляет ток 10 А.

1. $M = 10 \text{ Н м}$;
2. $M = 100 \text{ Н м}$;
3. $M = 1 \text{ Н м}$;
4. Для ответа на вопрос недостаточно данных.

№4. Определите коэффициент полезного действия генератора постоянного тока, на щитке которого указана мощность 5 кВт, а суммарные потери при номинальной нагрузке составляют 1,5 кВт

1. $\eta = 67\%$;
2. $\eta = 87,3\%$
3. $\eta = 75,4\%$;
4. $\eta = 76,9\%$

№5. Какой закон положен в основу работы двигателя постоянного тока?

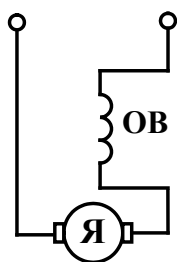
1. закон Ома;
2. закон Ампера;
3. закон электромагнитной индукции;
4. закон Ленца.

Тест 5.2

№1. Что произойдет если двигатель последовательного возбуждения, работающий под нагрузкой, перевести в режим холостого хода?

1. двигатель не запустится;
2. обмотка якоря перегреется;
3. двигатель пойдет «в разнос»;
4. двигатель изменит направление вращения якоря.

№2. На схеме изображен генератор постоянного тока



1. с параллельным возбуждением;
2. с возбуждением от постоянных магнитов;
3. с компаундным возбуждением;
4. с «сериесным» возбуждением;
5. с независимым возбуждением.

№3. При холостом ходе генератора постоянного тока установлено минимальное напряжение на его зажимах 115 В. При номинальном токе нагрузки напряжение снизилось до 103,5 В. Определите процентное изменение напряжения

- | | |
|---------|---------|
| 1. 5%; | 3. 8%; |
| 2. 12%; | 4. 10%. |

№4. Определите, к какому виду потерь энергии в электродвигателях можно отнести потери на трение в подшипниках, щеток о коллектор, потери на охлаждение.

1. магнитные потери;
2. механические потери;
3. добавочные потери.

№5. Определите, к какому виду потерь энергии в электродвигателях можно отнести потери в проводах обмоток машины, связанные с их нагревом.

1. электрические потери;
2. магнитные потери;
3. добавочные потери;
4. механические потери.

6 Электрические машины переменного тока

Электрические машины представляют собой электромеханические устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии в механическую и обратно.

Электрические машины переменного тока могут быть асинхронными или синхронными.

Асинхронные машины – это бесколлекторная машина переменного тока, у которой в установившемся режиме магнитное поле, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор вращаются с разными скоростями.

Синхронная машина – это машина переменного тока, у которой в установившемся режиме магнитное поле, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор имеют одинаковую частоту вращения.

Скольжение – это отношение разности между частотой вращения магнитного поля статора и частотой вращения ротора машины переменного тока к частоте вращения магнитного поля

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%, \quad (6.1)$$

где n_1 - частота вращения магнитного поля, об/мин.

Критическое скольжение – это скольжение, при котором асинхронная машина развивает максимальный вращающий момент

$$S_{кр} = S_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (6.2)$$

где $\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{ном}}$ - перегрузочная способность двигателя;

$S_{ном}$ – скольжение при номинальной нагрузке.

6.1 Асинхронные машины

Частота вращения магнитного поля асинхронной машины

$$n_1 = 60 \cdot \frac{f_1}{p}, \quad (6.3)$$

где f_1 - частота тока питающей сети, Гц;

p – число пар полюсов обмотки машины, определяется количеством обмоток.

Частота вращения ротора

$$n_2 = n_1 \cdot (1 - S) = 60 \cdot \frac{f_1}{p} \cdot (1 - S). \quad (6.4)$$

Частота тока и ЭДС, наводимая магнитным полем статора в проводниках ротора,

$$f_2 = S \cdot f_1 = S \frac{p \cdot n_1}{60}. \quad (6.5)$$

Действующие значения ЭДС, наводимой в каждой фазе обмотки статора,

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi_m \cdot K_{01}, \quad (6.6)$$

где w_1 – число витков одной фазы статора;

Φ_m – максимальное значение магнитного потока вращающегося магнитного поля, Вб;

K_{01} – обмоточный коэффициент статора, определяется способом изготовления обмоток статора.

Действующее значение ЭДС обмотки неподвижного ротора

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot \Phi_m \cdot K_{02}, \quad (6.7)$$

где $f_2 = f_1$ – частота ЭДС, наводимой в проводниках ротора, Гц;

w_2 – число витков одной фазы ротора;

K_{02} – обмоточный коэффициент ротора, определяется способом изготовления обмоток ротора.

Действующее значение ЭДС обмотки вращающегося ротора

$$E_{2S} = E_2 \cdot S, \quad (6.8)$$

где E_2 – ЭДС неподвижного ротора, В.

Отношение ЭДС обмоток статора E_1 к ЭДС обмоток ротора E_2 называют *коэффициентом трансформации асинхронного двигателя*

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_{01} \cdot w_1}{K_{02} \cdot w_2}. \quad (6.9)$$

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети

$$P_1 = 3U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi, \quad (6.10)$$

где $U_{1\phi}$ – фазное напряжение, В;

$I_{1\phi}$ – фазный ток, А;

U_1 – линейное напряжение, В;

I_1 – линейный ток, А;

$\cos \varphi$ – угол сдвига фаз между током и напряжением (коэффициент мощности).

Таким образом

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}, \quad (6.11)$$

где η – КПД двигателя.

Реактивная мощность

$$Q_1 = 3U_{1\phi} I_{1\phi} \cdot \sin \varphi = \sqrt{3}U_1 I_1 \sin \varphi. \quad (6.12)$$

Электромагнитная мощность

$$P = P_1 - \Delta P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos \varphi - (P_{1\phi} + P_{1m}) = M \cdot \omega_1, \quad (6.13)$$

где ΔP_1 – потери в статоре, Вт;

$P_{1\phi} = 3 \cdot R_1 I_1^2$ – электрические потери в статоре, Вт;

R_1 – сопротивление обмоток статора, Ом;

P_{1m} – потери в стали статора, Вт;

$P_{2\phi}$ – электрические потери ротора, Вт;

M – вращающий момент, Н·м;

ω_1 – угловая скорость вращающегося магнитного поля, рад/с.

Полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = P_1 - \sum P, \quad (6.14)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta, \quad (6.15)$$

$$P_2 = P_{эм} (1 - S) = M \cdot \omega_2, \quad (6.16)$$

$$P_2 = \frac{M \cdot n_2}{9,55}, \quad (6.17)$$

где $\sum P$ – сумма потерь асинхронного двигателя, Вт;

$P_{2э}$ – электрические потери ротора, Вт;

$P_{2м}$ – магнитные потери ротора, Вт;

$P_{мех}$ – механические потери, Вт;

P_{δ} – дополнительные потери, Вт;

ω_2 – угловая скорость ротора, рад/с;

M – вращающий момент на валу двигателя, Н·м.

$$\sum P = P_{1э} + P_{1м} + P_{2э} + P_{2м} + P_{мех} + P_{\delta}. \quad (6.18)$$

Вращающий момент на валу асинхронного двигателя

$$M = \frac{9,55 \cdot P_2}{n_2}. \quad (6.19)$$

Кратность пускового тока

$$K_I = \frac{I_n}{I_{ном}}, \quad (6.20)$$

где I_n – пусковой ток двигателя.

Кратность пускового момента

$$K_M = \frac{M_n}{M_{ном}}, \quad (6.21)$$

где M_n – пусковой момент двигателя.

Перегрузочная способность двигателя

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{ном}}, \quad (6.22)$$

где $M_{\max}$ – максимальный вращающий момент двигателя, Н·м;

$M_{ном}$ – номинальный вращающий момент двигателя, Н·м.

Коэффициент полезного действия электрической машины равен отношению полезной мощности P_2 к подводимой активной мощности P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}. \quad (6.23)$$

Частота вращения ротора и вращающегося магнитного поля статора синхронной машины

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}. \quad (6.24)$$

Мощность трехфазного генератора при симметричной нагрузке

$$P_2 = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (6.25)$$

Вращающийся момент генератора

$$M = \frac{P_{\text{э.м}}}{\omega} = \frac{9,55 P_1}{n_1}. \quad (6.26)$$

Уравнение баланса мощностей трехфазного генератора

$$P_2 = P_{\text{эм}} - P_{\text{э}} = P_{\text{эм}} - 3R_1 I^2. \quad (6.27)$$

Для построения естественной механической характеристики $M = f(S)$ электродвигателя используют формулу Клосса

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{S_{\text{кр}}/S + S/S_{\text{кр}}}. \quad (6.28)$$

Предварительно находят значение критического скольжения $S_{\text{кр}}$,

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{ном}} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (6.29)$$

Зная значения M_{max} ($M_{\text{кр}}$) и $S_{\text{кр}}$, и используя расчётную формулу (6.31), можно для любого значения S найти соответствующий момент M и построить кривую $M = f(S)$.

Вращающий момент асинхронного электродвигателя при заданном скольжении прямо пропорционален квадрату напряжения. В связи с этим понижение напряжения в электрической сети, питающей электродвигатель, отрицательно сказывается на его работе. Резкое снижение пускового и максимального моментов затрудняет, а иногда делает невозможным пуск тяжёлых производственных машин и снижает допускаемые кратковременные перегрузки двигателя.

Так как потери в цепи ротора пропорциональны скольжению, то потери в двигателе при $S' > S_1$ значительно превышают номинальные потери ΔP_n , на которые двигатель рассчитан по условиям допустимого нагрева его обмоток.

Повышение напряжения $U > U'_н$ вызывает увеличение реактивной мощности, потребляемой асинхронным двигателем, поэтому оно также нежелательно. В связи с этим правилами устройства электроустановок отклонения напряжения на зажимах электродвигателей от номинального допускаются в пределах $\pm 5\%$.

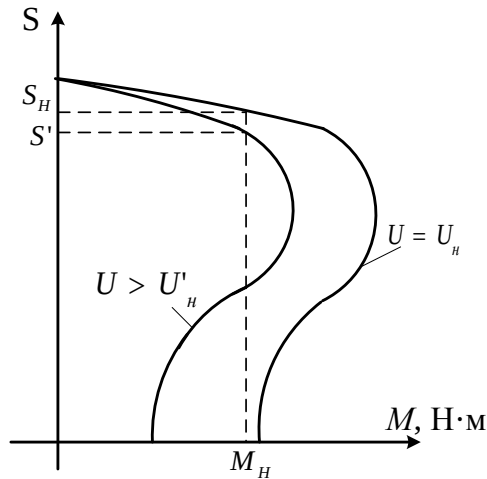


Рис. 6.1. Механические характеристики

6.2 Синхронные машины

ЭДС первичной обмотки статора синхронной машины

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot w_1 \cdot K_1. \quad (6.30)$$

Уравнение ЭДС для синхронного генератора

$$U_1 = E_0 + E_c + I_1 \cdot R_1, \quad (6.31)$$

где E_0 — основная ЭДС генератора, В;

E_c — ЭДС реакции якоря рассеяния, В;

I_1 — ток обмотки статора, А;

R_1 — активное сопротивление обмотки статора, Ом.

КПД трехфазного генератора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + \sum P)}. \quad (6.32)$$

ПРИМЕР решения задач

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором изготовлен на номинальное напряжение 220/380 В. Двигатель подключен к сети с напряжением $U_{1НОМ} = 380$ В, нагрузка на его валу – номинальная.

Дано: номинальный ток, потребляемый двигателем из сети $I_{1НОМ} = 9,15$ А; номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{ном} = 82$ %; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{1НОМ} = 0,81$; номинальное скольжение $S_{НОМ} = 5$ %; число пар полюсов $p = 3$; частота тока сети $f = 50$ Гц; способность двигателя к перегрузке $\lambda = \frac{M_{MAX}}{M_{НОМ}} = 2,5$; кратность пускового

момента $K_M = \frac{M_{П}}{M_{НОМ}} = 2,0$; кратность пускового тока $K_I = \frac{I_{1П}}{I_{1НОМ}} = 5,0$.

Определить:

- 1) схему включения обмоток статора двигателя;
- 2) мощность, потребляемую двигателем из сети $P_{1НОМ}$;
- 3) номинальную мощность на валу двигателя $P_{2НОМ}$;
- 4) суммарные потери мощности в двигателе при номинальном режиме $\sum P$;
- 5) частоту вращения магнитного поля статора n_1 ;
- 6) номинальную частоту вращения ротора $n_{2НОМ}$;
- 7) частоту тока в роторе f_2 ;
- 8) номинальный, пусковой и максимальный моменты на валу двигателя $M_{НОМ}, M_{П}, M_{MAX}$;

- 9) пусковой ток, потребляемый двигателем из сети.

Подсчитать при номинальной нагрузке на валу двигателя величину номинального $I_{1НОМ}^I$ и пускового $I_{П}^I$ тока при напряжении сети $U_{1НОМ}^I = 220$ В. Какова будет схема включения обмоток статора двигателя в этом случае?

Решение:

1. Двигатель изготовлен на номинальное напряжение 220/380 В. Это значит, что при подключении к сети с $U_{1НОМ} = 380 \text{ В}$ в обмотках его статора должны быть соединены по схеме «звезда».

2. Номинальная мощность, потребляемая двигателем из сети

$$P_{1НОМ} = \sqrt{3} \cdot U_{1НОМ} \cdot I_{1НОМ} \cdot \cos \varphi_{1НОМ} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 9,15 \cdot 0,81 = 4878 \text{ Вт}.$$

3. Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{2НОМ} = P_{1НОМ} \cdot \eta_{НОМ} = 4878 \cdot 0,82 = 4000 \text{ Вт}.$$

4. Суммарные потери мощности в двигателе при номинальном режиме работы $\sum P = P_{1НОМ} - P_{2НОМ} = 4878 - 4000 = 878 \text{ Вт}.$

5. Частота вращения магнитного поля статора

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин}.$$

6. Частота вращения ротора при номинальном режиме работы

$$n_{2НОМ} = n_1 \cdot (1 - S_{НОМ}) = 1000 \cdot (1 - 0,05) = 950 \text{ мин}^{-1}.$$

7. Частота тока в роторе $f_2 = f_1 \cdot S_{НОМ} = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ Гц}.$

8. Номинальный момент на валу двигателя

$$M_{НОМ} = \frac{60 \cdot P_{2НОМ}}{2\pi \cdot n_{2НОМ}} = \frac{60 \cdot 4000}{2\pi \cdot 950} = 40,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

9. Пусковой момент на валу двигателя

$$M_{П} = K_M \cdot M_{НОМ} = 2 \cdot 40,2 = 80,4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

10. Максимальный момент на валу двигателя

$$M_{МАХ} = \lambda \cdot M_{НОМ} = 2,5 \cdot 40,2 = 100,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

11. Пусковой ток двигателя $I_{1П} = K_I \cdot I_{1НОМ} = 6 \cdot 9,15 = 54,9 \text{ А}.$

12. При номинальном напряжении сети $U_{1НОМ}^! = 220 \text{ В}$ обмотки двигателя для работы в номинальном режиме должны быть соединены по схеме «треугольник».

В этом случае номинальный ток будет равен

$$I_{1НОМ}^I = \frac{P_{1НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{1НОМ}^I \cdot \cos \varphi_{1НОМ}} = \frac{4878}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,81} = 15,8 \text{ А.}$$

13. Значение пускового тока: $I_{1П}^I = K_I \cdot I_{1НОМ}^I = 6 \cdot 15,8 = 94,8 \text{ А.}$

Можно заметить, что токи $I_{1НОМ}^I$ и $I_{1П}^I$ возросли по сравнению с токами $I_{1НОМ}$ и $I_{1П}$ в $\sqrt{3}$, так как напряжение, подключенное к двигателю, стало в $\sqrt{3}$ раза меньше.

ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 6.1

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором питается от сети с линейным напряжением 380 В. Величины, характеризующие номинальный режим двигателя: номинальная мощность на валу P_n , частота вращения ротора n_n , коэффициент мощности $\cos \varphi$, КПД (η). Обмотки фаз статора соединены звездой. Коэффициент критического момента относительно номинального $K_M = M_{кр}/M_n$.

Определить:

- 1) номинальный ток в фазе обмоток статора $I_{1н}$;
- 2) число пар полюсов p ;
- 3) номинальное скольжение $S_{ном}$;
- 4) номинальный момент на валу $M_{ном}$;
- 5) критический момент $M_{кр}$;
- 6) критическое скольжение $S_{кр}$;
- 7) определить значение моментов, соответствующие значениям скольжения $S = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$;
- 8) определить пусковой момент при снижении напряжения сети на 10%;
- 9) построить механическую характеристику $n=f(M)$.

Таблица 6.1.

Вариант	Данные к задаче 6.1				
	P_n , кВт	n_n , об/мин	$\cos\varphi_n$	η , %	K_n
1	1,1	2800	0,7	75	2,2
2	1,2	1450	0,75	76	2,0
3	1,6	1430	0,78	78	2,2
4	2,0	1460	0,8	82	2,0
5	2,2	950	0,85	83	1,8
6	2,4	1430	0,87	85	2,0
7	3,0	1450	0,9	90	1,9
8	2,8	1460	0,8	88	1,9
9	3,2	950	0,92	90	1,8
10	2,8	960	0,9	87	1,7
11	2,6	1450	0,89	88	2,0
12	2,5	1460	0,88	86	2,2
13	2,2	960	0,9	85	2,1
14	1,2	2850	0,78	85	2,5
15	1,8	2800	0,85	87	2,4
16	1,5	2750	0,82	90	2,0
17	1,6	2850	0,8	88	2,2
18	1,0	2900	0,78	89	2,4
19	3,2	950	0,9	92	1,8
20	3,5	960	0,9	90	1,7
21	1,1	2850	0,87	79,5	2,2
22	1,5	2825	0,88	80,5	2,2
23	2,2	2850	0,89	83,0	2,2
24	3,0	1430	0,84	83,5	2,2
25	4,0	1430	0,85	86,0	2,2
26	5,5	1440	0,86	88,0	2,2
27	7,5	1440	0,87	88,5	2,2
28	10	960	0,89	88,0	1,8
29	13	960	0,89	88,0	1,8
30	17	960	0,90	90,0	1,8

Задача 6.2

Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором единой серии 4А имеет номинальные данные, указанные в таблице 6.2. Номинальные: линейное напряжение питающей цепи $U_{1ном}$, частота питающего тока $f_1=50$ Гц, мощность на валу $P_{2ном}$, синхронная частота вращения магнитного поля n_1 , скольжение ротора $S_{ном}$, КПД $\eta_{ном}$, коэффициент мощности $\cos\varphi_{1ном}$, кратность пускового момента K_1 , кратность пускового мо-

мента K_m , перегрузочная способность двигателя λ , недогрузочная способность $K_{\min} = \frac{M_{\min}}{M_{\text{ном}}}$.

Определить

- 1) номинальный $M_{\text{ном}}$;
- 2) начальный пусковой $M_{\text{пуск}}$;
- 3) максимальный $M_{\text{мах}}$ моменты;
- 4) номинальный $I_{\text{ном}}$ и пусковой $I_{\text{пуск}}$ токи;
- 5) частоту тока в роторе $f_{2\text{ном}}$ при номинальной нагрузке и в момент пуска $f_{2\text{пуск}}$;
- 6) число пар полюсов обмотки p ;
- 7) синхронную частоту вращения магнитного поля ω_1 ;
- 8) угловую частоту вращения ротора $\omega_{2\text{ном}}$;
- 9) мощность на зажимах двигателя $P_{\text{ном}}$ при номинальном режиме работы.

Таблица 6.2

Вариант	Данные к задаче 6.2									
	$U_{\text{ном}}$ В	$P_{2\text{ном}}$ кВт	n_1 , об/мин	$S_{\text{ном}}$, %	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{1\text{ном}}$	K_I	K_m	$K_{\min}$	λ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	220	0,18	1500	8,9	0,64	0,64	3,5	2,1	1,5	2,2
2	380	0,25	1500	8,0	0,68	0,65	4,0	2,0	1,5	2,2
3	220	0,37	1500	9,0	0,68	0,69	4,0	2,0	1,5	2,2
4	380	0,55	1500	7,3	0,70	0,70	4,5	2,0	1,8	2,2
5	660	0,75	1500	7,5	0,72	0,73	5,0	2,0	1,8	2,2
6	220	1,1	1500	5,4	0,75	0,81	5,0	2,0	1,6	2,2
7	380	1,5	1500	5,8	0,77	0,83	6,0	2,0	1,6	2,2
8	660	2,2	1500	5,1	0,80	0,83	6,0	2,1	1,6	2,4
9	220	3,0	1500	4,4	0,82	0,83	6,0	2,0	1,6	2,4
10	380	4,0	1500	4,6	0,84	0,84	6,0	2,0	1,6	2,4
11	660	5,5	1500	3,6	0,85	0,85	7,0	2,0	1,6	2,2
12	220	7,5	1500	2,9	0,87	0,86	7,0	2,2	1,7	3,0
13	380	11	1500	2,8	0,87	0,87	7,5	2,2	1,7	3,0
14	660	15,0	1500	2,3	0,88	0,88	7,0	1,4	1,0	2,3

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15	220	18,5	1500	2,2	0,88	0,88	7,0	1,4	1,0	2,3
16	380	22	1500	2,0	0,90	0,90	6,5	1,4	1,0	2,3
17	660	30,0	1500	1,9	0,90	0,90	6,5	1,4	1,0	2,3
18	220	37,0	1500	1,7	0,91	0,90	7,0	1,4	1,0	2,5
19	380	45,0	1500	1,6	0,93	0,90	7,0	1,4	1,0	2,5
20	660	55,0	1500	1,4	0,92	0,90	7,0	1,3	1,0	2,5
21	220	75,0	1500	1,2	0,93	0,90	7,0	1,2	1,0	2,3
22	380	90,0	1500	1,3	0,93	0,91	7,0	1,2	1,0	2,3
23	660	110,0	1500	2,3	0,92	0,90	6,0	1,2	1,0	2,0
24	220	0,18	3000	8,0	0,66	0,76	4,0	2,0	1,5	2,2
25	380	0,25	3000	7,5	0,68	0,77	4,0	2,0	1,5	2,2
26	220	0,37	3000	8,3	0,7	0,86	4,5	2,0	1,5	2,2
27	380	0,55	3000	8,5	0,73	0,86	4,5	2,0	1,5	2,2
28	380	0,75	3000	5,9	0,77	0,87	5,5	2,0	1,5	2,2
29	220	1,1	3000	6,3	0,77	0,87	5,5	2,0	1,5	2,2
30	380	1,5	3000	4,2	0,81	0,85	6,5	2,1	1,4	2,6
31	380	0,09	3000	8,67	0,60	0,7	5	2,0	2,2	1,2
32	380	0,12	3000	9,67	0,63	0,7	5	2,0	2,2	1,2
33	380	0,25	3000	7,67	0,68	0,77	5	2,0	2,2	1,2
34	660	1,1	3000	6,33	0,775	0,87	5,5	2,0	2,2	1,2
35	660	7,5	3000	3,33	0,875	0,88	7,5	2,0	2,2	1,0
36	220	22	3000	2,0	0,885	0,91	7,5	1,4	2,2	1,0
37	380	30	3000	1,83	0,905	0,90	7,5	1,4	2,2	1,0
38	660	2,2	3000	5,0	0,83	0,87	6,5	2,0	2,2	1,2
39	220	132	3000	1,0	0,915	0,89	7,0	1,2	2,2	1,0
40	380	0,12	1500	8,33	0,63	0,66	5,0	2,0	2,2	1,2
41	660	0,37	1500	9,0	0,68	0,69	5,0	2,0	2,2	1,2
42	380	11,0	1500	2,67	0,875	0,87	7,5	2,2	3,0	1,7
43	220	22,0	1500	2,0	0,90	0,90	6,5	1,4	2,3	1,0
44	660	37,0	1500	1,67	0,91	0,90	7,0	1,4	2,3	1,0
45	220	110	1500	2,0	0,925	0,90	5,5	1,2	2,0	1,0
46	380	250	1500	1,0	0,945	0,92	7,0	1,2	2,0	0,9
47	660	0,25	1000	11,0	0,59	0,62	3,0	2,2	2,2	1,5
48	220	0,75	1000	8,5	0,69	0,74	4,0	2,0	2,2	1,6
49	380	5,5	1000	3,5	0,85	0,80	6,5	2,0	2,5	1,8
50	660	75,0	1000	1,5	0,92	0,89	5,5	1,4	2,2	1,2

Задача 6.3

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором питается от сети с линейным напряжением $U_{\text{л}}$. Величины, характеризующие номинальный режим двигателя: мощность на валу $P_{2\text{н}}$; частота вращения ротора $n_{2\text{н}}$; коэффициент мощности $\cos\varphi_{1\text{н}}$; КПД $\eta_{\text{н}}$. Номинальное фазное напряжение $U_{1\text{ф}} = 220\text{В}$. Кратность пускового тока K_{I} при пуске без реостата и номинальном напряжении на зажимах статора; коэффициент мощности в этих условиях $\cos\varphi_{1\text{к}} = 0,35$. Обмотки фаз ротора соединены звездой.

Определить: 1) схему соединения фаз обмотки статора «звезда»; 2) номинальный момент на валу ротора $M_{\text{ном}}$; 3) номинальный и пусковой токи двигателя $I_{\text{ном}}$ и $I_{\text{н}}$; 4) критическое скольжение $S_{\text{кр}}$; 5) вычислить значения моментов для следующих значений скольжения: $S_{\text{н}}$; $S_{\text{к}}$; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 6) Построить кривую $M=f(S)$.

Таблица 6.3

Вариант	Данные к задаче 6.3					
	U, В	$P_{2\text{ном}}$, кВт	$n_{2,\text{об/мин}}$	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos\varphi_{1\text{ном}}$	K_{I}
1	220	7,5	1400	82,0	0,84	7,0
2	380	10	1400	83,5	0,85	7,0
3	220	13	1400	84,5	0,86	7,0
4	380	14	950	84,5	0,80	6,5
5	220	22	955	85,0	0,81	6,5
6	380	30	960	87,0	0,82	6,5
7	220	40	720	87,0	0,81	5,5
8	380	55	720	88,5	0,82	5,5
9	380	75	1455	90,0	0,88	6,5
10	380	100	1460	90,5	0,88	6,5
11	220	0,18	1335	64,0	0,64	3,5
12	380	0,25	1200	68,0	0,65	4,0
13	220	0,37	1350	68,0	0,69	4,0
14	380	0,55	1095	70,0	0,70	4,5
15	220	0,75	1125	72,0	0,73	5,0
16	380	1,1	825	75,0	0,81	5,0
17	220	1,5	870	77,0	0,83	6,0
18	380	2,2	765	80,0	0,83	6,0
19	380	3,0	660	82,0	0,83	6,0
20	380	4,0	690	84,0	0,84	6,0

Тестовые задания для самоконтроля

Тема: Машины переменного тока

Тест 6.1

№1. Какое магнитное поле возникает при питании переменным током однофазной обмотки?

1. вращающееся;
2. пульсирующее;
3. магнитное поле не возникает.

№2. На какую мощность должен быть рассчитан генератор, питающий асинхронный двигатель, который развивает на валу механическую мощность 5 кВт при $\cos \varphi = 0,5$?

1. 5 кВ·А;
2. 10 кВ·А;
3. 25 кВ·А.

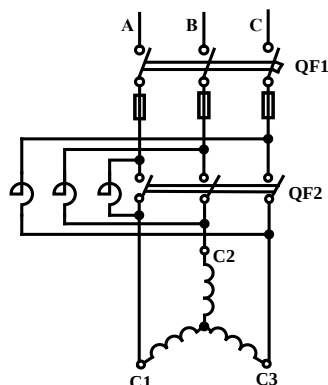
№3. Для асинхронного двигателя найти момент на валу двигателя, если $P_2=3$ кВт и $n = 2940$ об/мин.

1. 0,995 Н·м;
2. 9750 Н·м;
3. 995 Н·м;
4. 9,75 Н·м.

№4. В синхронной машине в режиме двигателя ротор вращается.....

1. медленнее поля статора
2. со скоростью вдвое больше скорости вращения поля статора
3. быстрее поля статора
4. со скоростью равной скорости вращения поля статора

№5. По электрической схеме определите способ пуска трехфазного асинхронного электродвигателя.....



1. реакторный пуск
2. автотрансформаторный пуск
3. пуск переключением обмоток с «звезды» на «треугольник»
4. реостатный пуск

Тест 6.2

№1. Какова формула для определения скольжения для асинхронных машин

$$1. S = \frac{n_2 - n_1}{n_2};$$

$$3. S = \frac{n_1 - n_2}{n_2}$$

$$2. S = \frac{n_2 - n_1}{n_1};$$

$$4. S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

№2. От какой величины не зависит коэффициент мощности при режиме холостого хода $\cos \varphi_0$ (на холостом ходу)?

1. от тока;
2. номинальной мощности;
3. конструктивного исполнения машины;
4. регулировочного сопротивления.

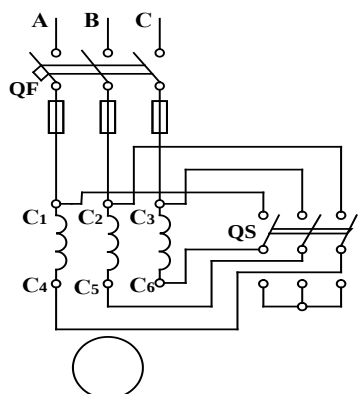
№3. Если скорость вращения поля статора синхронной двухполюсной машины 1500 об/мин., то номинальная скорость вращения ротора.....

1. 2940 об/мин;
2. 1500 об/мин;
3. 1000 об/мин;
4. 3000 об/мин.

№4. Что необходимо сделать, чтобы изменить направление вращения магнитного поля, т.е. осуществить РЕВЕРС?

1. изменить порядок подключения двух любых фазных обмоток;
2. изменить частоту вращения ротора;
3. добавить в обмотку ротора сопротивление.

№5. Схема, представленная на рисунке используется для.....



1. уменьшения подаваемого напряжения;
2. уменьшения скорости вращения ротора;
3. уменьшения пускового тока;
4. для запуска маломощных двигателей.

7 Основы электроники

7.1 Биполярный транзистор

Биполярный транзистор (БТ) – это полупроводниковая структура, состоящая из двух р-п переходов, сформированных в одном монокристалле.

На рисунке 7.1 а) показана условная структура р-п-р транзистора, а на рисунке 7.1 б) приведены обозначения ***р-п-р*** и ***п-р-п*** - транзисторов.

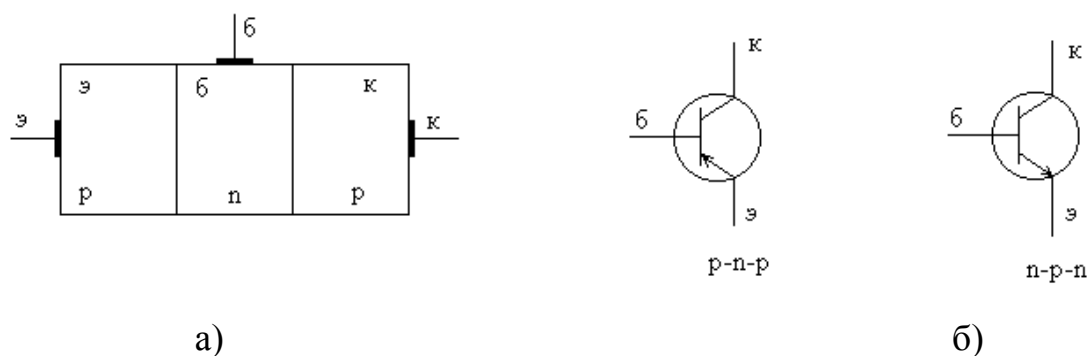


Рис. 7.1. Структура *р-п-р* транзистора:

Как видно из рисунка 7.1 а), биполярный транзистор содержит два р-п- перехода: эмиттерно-базовый (эмиттерный) и коллекторно-базовый (коллекторный). Буквами «э», «б» и «к» обозначены области эмиттера, базы и коллектора, а также одноименные электроды (внешние выводы) БТ.

Один и тот же транзистор может быть включен различными способами. Основные параметры (характеристики) схем включения различны.

К основным параметрам транзисторных усилителей относятся коэффициент усиления тока K_i ; коэффициент усиления напряжения K_u ; коэффициент усиления по мощности K_p ($K_p = K_u K_i$); входное сопротивление (по переменному току); выходное сопротивление (по переменному току); частотные свойства (обычно частотные свойства транзистора выражаются его предельной частотой, то есть частотой, при которой модуль коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером стремится к единице).

Выбор схемы включения транзистора осуществляется по критерию оптимальности его параметров: коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений и амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

7.1.1 Схема с общей базой (ОБ)

При составлении электрических схем общепринято так располагать элементы схем, чтобы сигнал «направлялся» слева направо. Напряжения на переходах транзистора обычно обозначают двумя подстрочными символами, а ток через электрод транзистора – одним подстрочным символом. Стрелка на изображении БТ (рис. 7.1) указывает условное (положительное) направление тока эмиттера.

Базовый вывод транзистора в схеме с ОБ является общим выводом для входного и выходного сигналов. Входной сигнал подают на эмиттер, а выходной снимают с коллектора.

На рисунке 7.2, а) приведена упрощенная схема включения БТ по схеме ОБ.

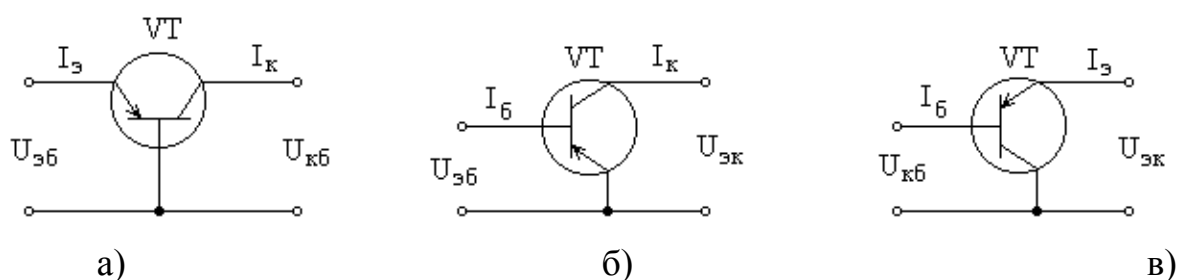


Рис. 7.2. Схемы включения БТ:

а) по схеме ОБ; б) по схеме ОЭ; в) по схеме ОК

Определим коэффициент передачи тока $K_{iб}$ для схемы ОБ (*коэффициентом передачи тока* называют отношение выходного тока к входному, а *коэффициентом передачи* – отношение выходной величины к входной)

$$K_{iб} = \frac{I_к}{I_э} = \alpha < 1, \quad (\alpha \approx 0,95 \dots 0,99 \approx 1). \quad (7.1)$$

Таким образом, схема с ОБ не обеспечивает усиление по току (схема с ОБ обеспечивает усиление по напряжению). Достоинства схемы ОБ – хорошие частотные характеристики.

7.1.2 Схема с общим эмиттером (ОЭ)

На рисунке 7.2 б) приведена упрощенная схема включения транзистора по схеме ОЭ. Общим выводом в ней является эмиттер: входной сигнал подается между базой и эмиттером, а выходной сигнал снимается между коллектором и эмиттером.

Определим коэффициент передачи тока $K_{iэ}$ для схемы ОЭ

$$K_{iэ} = \frac{I_{\kappa}}{I_{\sigma}} = \frac{I_{э} \alpha}{(1-\alpha)I_{э}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta. \quad (7.2)$$

Так как схема ОЭ используется наиболее часто, то коэффициенту $K_{iэ}$ присвоено собственное обозначение β (величина β обычно находится в диапазоне от десятков до сотен, а в супер β - транзисторах величина этого коэффициента доходит до тысячи). Достоинство этой схемы включения БТ состоит и в том, что она позволяет усиливать напряжение в десятки раз (то есть коэффициент K_u схемы ОЭ достигает несколько десятков). Таким образом, для схемы включения транзистора ОЭ коэффициент усиления по мощности K_p наибольший по сравнению с соответствующими коэффициентами других схем включения (ОБ и ОК). Недостатком схемы ОЭ является то, что ее частотные свойства хуже, чем у других схем включения БТ.

Свойства транзисторов можно описать с помощью входных и выходных статических характеристик, а также с применением так называемых h -параметров, связывающих входное напряжение и ток с выходным напряжением и током, действующими в эквивалентном транзистору четырехполюснике (то есть электрической схеме, имеющей четыре клеммы – полюса).

В общем случае изменение напряжения базы и тока коллектора в зависимости от изменения входного тока и коллекторного напряжения транзистора с общим эмиттером можно записать в виде

$$\begin{aligned} dU_{\delta-\varepsilon} &= h_{11} \cdot dI_{\delta} + h_{12} \cdot dU_{\kappa-\varepsilon}, \\ dI_{\kappa} &= h_{21} \cdot dI_{\delta} + h_{22} \cdot dU_{\kappa-\varepsilon}, \end{aligned} \quad (7.3)$$

где h -параметры имеют следующий физический смысл:

$h_{11} = R_{\delta-\varepsilon}$ – входное сопротивление;

h_{12} – коэффициент обратной передачи (малая величина, на практике принимают равной нулю);

$h_{21} = \beta$ – коэффициент усиления по току;

$h_{22} = \frac{1}{R_{\kappa-\varepsilon}}$ – выходная проводимость.

Коэффициенты по току, напряжению и мощности определяют через h -параметры транзистора и параметры элементов цепи по формулам

$$\begin{aligned} K_i &= \frac{h_{21}}{1 + h_{22} \cdot R_H}, \\ K_u &= \frac{h_{21} \cdot R_H}{h_{11} \cdot (1 + h_{22} \cdot R_H) - h_{12} \cdot h_{21} \cdot R_H}, \\ K_p &= K_i \cdot K_u. \end{aligned} \quad (7.4)$$

Входное сопротивление находят как

$$R_{\text{ex}} = \frac{h_{11} \cdot \left(h_{22} + \frac{1}{R_H} \right) - h_{12} \cdot h_{21}}{h_{22} + \frac{1}{R_H}}. \quad (7.5)$$

Формулы (7.4) и (7.5) являются точными. Коэффициенты усиления и значения входного сопротивления можно определить по приближенным формулам

$$\begin{aligned} K_i &= h_{21}; \quad R_{\text{ex}} = h_{11}; \\ K_u &= \frac{h_{21} \cdot R_H}{h_{11}}, \end{aligned} \quad (7.6)$$

$$K_p = K_i \cdot K_u.$$

7.1.3 Схема с общим коллектором (ОК)

На рисунке 7.2, в) приведена упрощенная схема включения транзистора по схеме ОК. В этой схеме общим выводом для входного и выходного сигналов является коллектор. Входной сигнал подают на базу.

Определим коэффициент передачи тока $K_{ик}$ для схемы ОК

$$K_{ик} = \frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{э}}}{(1-\alpha)I_{\text{э}}} = \frac{1}{1-\alpha} = \beta + 1. \quad (7.7)$$

Из выражения (7.7) следует, что коэффициент усиления по току в данной схеме является максимально возможной величиной. Коэффициент передачи напряжения $K_{вк}$ схемы ОК меньше и примерно равен единице ($K_u \approx 1$).

Схему ОК часто называют *эмиттерным повторителем*, так как в ней сигнал на выходе повторяет входной сигнал по напряжению.

7.2 Электронные устройства

Мультиплексор (MS) — коммутатор цифровых сигналов, представляющий собой комбинационное устройство (КУ) с m информационными, n управляющими входами и одним выходом. Функционально MS состоит из m элементов конъюнкции, выходы которых объединены дизъюнктивно с помощью элемента "ИЛИ", имеющего m входов. На одни входы всех элементов конъюнкции подаются информационные сигналы, а другие входы этих элементов соединены с соответствующими выходами дешифратора с n входами.

Количество управляющих (адресных) и информационных входов мультиплексора связаны простым соотношением

$$m = 2^n \quad (7.8)$$

Обозначают мультиплексор $m \rightarrow 1$ ($2 \rightarrow 1$, $4 \rightarrow 1$, $8 \rightarrow 1$), учитывая, что мультиплексор является КУ, коммутирующим m входных каналов с одним выходным. Функциональная схема мультиплексора приведена на рисунке 7.3.

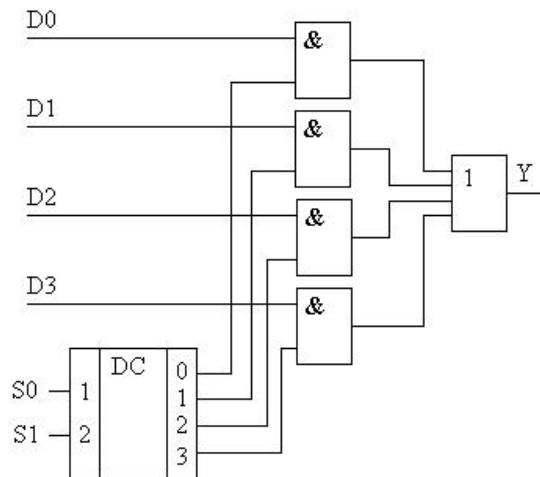


Рис 7.3. Функциональная схема мультиплексора $4 \rightarrow 1$

Из рисунка 7.3 следует, что мультиплексор содержит дешифратор на соответствующее число выходов (число выходов дешифратора определяется числом информационных входов мультиплексора), элементы конъюнкции на два или на три входа каждый и элемент дизъюнкции с числом входов, равным количеству информационных линий $D_0 \dots D_m$. Число входов элементов "И" может быть равным двум, однако, во многих случаях возникает необходимость стробирования выходного сигнала мультиплексора импульсами независимого источника.

В таких случаях в структуре мультиплексора используются элементы "И" с тремя входами. Одни из входов всех элементов конъюнкции, в последнем случае, объединяются, и по этой линии подается сигнал разрешения работы мультиплексора (стробирующий сигнал). Наличие дополнительного управляющего входа расширяет функциональные возможности мультиплексора.

На рисунке 7.4 показано условное графическое обозначение мультиплексора на принципиальных и функциональных электрических схемах.

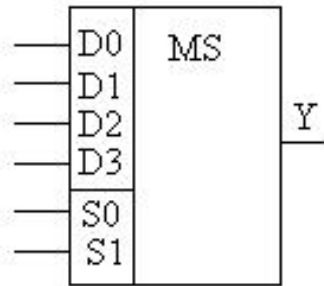


Рис. 7.4. Условное графическое обозначение мультиплексора 4→1

Уравнение функционирования мультиплексора 4→1 можно записать в следующем виде

$$Y = D0 \overline{S1} \overline{S0} + D1 \overline{S1} S0 + D2 S1 \overline{S0} + D3 S1 S0 \quad (7.9)$$

Из уравнения (7.9) видно, что на выход мультиплексора будет передаваться сигнал только с одного входа, номер которого совпадает с числом, соответствующим кодовой комбинации $S0$ и $S1$. Если $S0 = S1 = 0$, на выход мультиплексора будет передаваться сигнал с входа $D0$. Когда на адресных (управляющих) входах $S0 = 1$ и $S1 = 0$, то на выход будет передаваться сигнал с входа $D1$ и т.д.

Мультиплексоры нашли широкое применение в вычислительной технике в качестве коммутаторов цифровых сигналов. Они используются в компьютерах и микропроцессорных контроллерах для коммутации адресных входов динамических оперативных запоминающих устройств, в узлах объединения или разветвления шин и т.д. На базе мультиплексоров можно построить различные КУ с минимальным числом дополнительных элементов логики.

7.3 Электронные усилители

Схема усилителя, представленная на рисунке 7.5, двухкаскадная, то есть входное напряжение усиливается два раза: сначала транзистором VT_1 , а затем транзистором VT_2 .

Оба транзистора включены по схеме с общим эмиттером. В каждом каскаде эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей, а резисторы $R_{\kappa 1}$ и $R_{\kappa 2}$, с помощью которых создается выходное напряжение, включаются в коллекторные цепи транзисторов. Полярность источника питания с э. д. с. E_{κ} по отношению к коллекторной цепи зависит от типа транзистора.

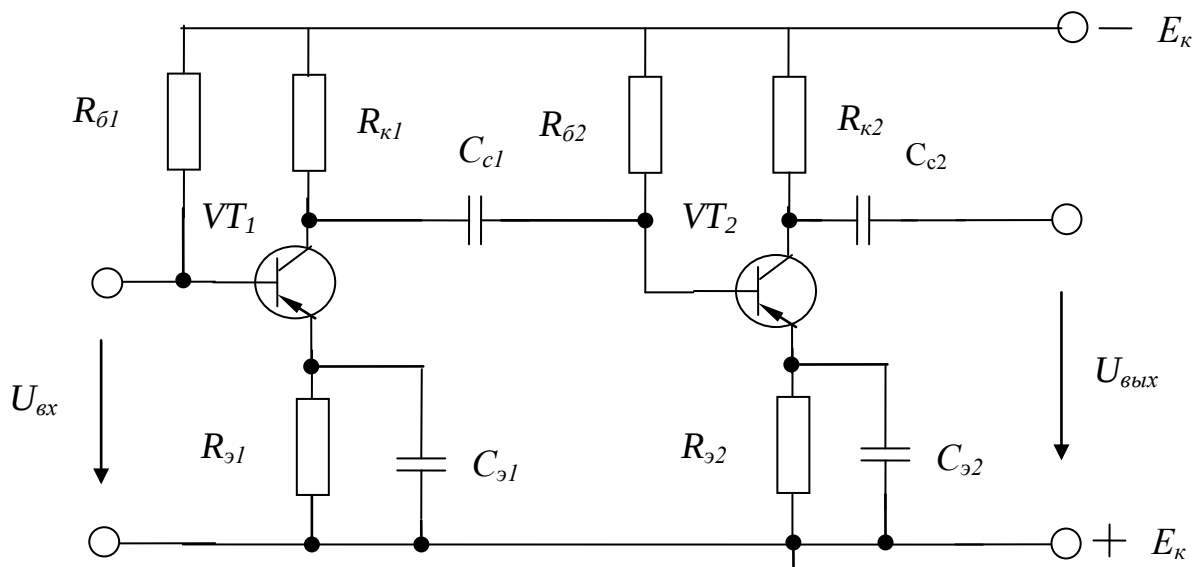


Рис. 7.5. Схема усилителя

На рисунке 7.5 полярность источника питания соответствует усиленным каскадам с транзисторами типа ***p-n-p***. Резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$, включенные в цепи базы транзисторов, обеспечивают их работу в режиме покоя, то есть в отсутствие входного сигнала.

Благодаря этим резисторам можно получить оптимальные значения тока базы $I_{б}$ и напряжения между базой и эмиттером $U_{бэ}$, соответствующие середине линейного участка нагрузочной характеристики.

Конденсатор $C_{с1}$ не пропускает постоянную составляющую коллекторного напряжения транзистора VT_1 в базовую цепь транзистора VT_2 . Конденсатор связи $C_{с2}$ не пропускает постоянную составляющую коллекторного напряжения транзистора VT_2 в нагрузку на выходе второго каскада. В каждом усилительном каскаде применена эмиттерная температур-

ная стабилизация, обеспечиваемая резисторами $R_{\delta 1}$ и $R_{\delta 2}$ и конденсаторами $C_{\varepsilon 1}$ и $C_{\varepsilon 2}$.

Коэффициентом усиления одного каскада по напряжению называют отношение напряжения на выходе к напряжению на входе

$$K_v = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (7.10)$$

где $U_{\text{вых}}$, $U_{\text{вх}}$ – напряжения на выходе и входе усилителя.

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных усилительных каскадов

$$K = K_{v1} \cdot K_{v2}. \quad (7.11)$$

Коэффициент частотных искажений усилительного каскада

$$M = \frac{K_0}{K}, \quad (7.12)$$

где K_0 – коэффициент усиления на средних частотах; K – коэффициент усиления на какой-либо частоте рабочего диапазона.

Коэффициент усиления транзисторного каскада на средних частотах

$$K_0 = \frac{h_{21\varepsilon} \cdot R_n}{R_{\text{вх}}}, \quad (7.13)$$

где $h_{21\varepsilon}$ – статистический коэффициент усиления тока базы в схеме с общим эмиттером;

R_n – сопротивление коллекторной нагрузки, Ом;

$R_{\text{вх}}$ – входное сопротивление транзистора, Ом.

Напряжение смещения в транзисторном каскаде при использовании схемы эмиттерной температурной стабилизации

$$U_{\delta\varepsilon} = I_{\text{дел}} \cdot R_2 - I_{\varepsilon 0} \cdot R_{\varepsilon}, \quad (7.14)$$

где $I_{\text{дел}} = \frac{E_k}{R_1 + R_2}$ – постоянный ток делителя в цепи базы транзистора;

$I_{\varepsilon 0}$ – постоянная составляющая тока эмиттера, А.

Емкость блокировочного конденсатора в цепи катода (эмиттера)

$$C \geq \frac{10}{(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot R)}, \quad (7.15)$$

где f_n – нижняя граница спектра усиливаемых колебаний, Гц;
 R – сопротивление резистора в цепи катода (эмиттера), Ом.

Электрический КПД усилителя

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0}, \quad (7.16)$$

где $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность усилителя, Вт;
 P_0 – мощность, расходуемая источником коллекторного (анодного) питания, Вт.

ПРИМЕР 7.

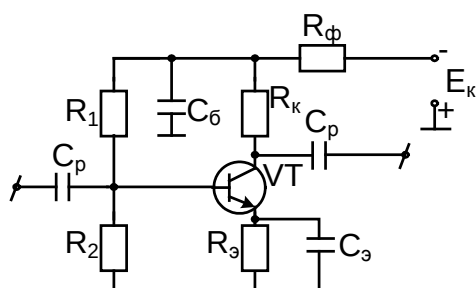


Рис. 7.6

В транзисторном усилительном каскаде (рис 7.6) мощность входного сигнала $P_{\text{вх}} = 0,150$ мВт при входном токе $I_{\text{вх}} = 500$ мкА. Определить коэффициент усиления каскада по напряжению, если сопротивление резистора в цепи

коллектора $R_k = 4700$ Ом, сопротивление нагрузки $R_n = 350$ Ом, а статистический коэффициент усиления тока базы $h_{21э} = 40$.

Решение

1. Определяем входное сопротивление каскада

$$R_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}^2} = \frac{0,15 \cdot 10^{-3}}{(500 \cdot 10^{-6})^2} = 600 \text{ Ом.}$$

2. Определяем сопротивление эквивалентной нагрузки в коллекторной цепи каскада

$$R'_n = \frac{R_k \cdot R_n}{(R_k + R_n)} = \frac{4700 \cdot 350}{(4700 + 350)} = 325 \text{ Ом.}$$

2. Определяем коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K = \frac{h_{21} \cdot R'_n}{R_{\text{вх}}} = \frac{40 \cdot 325}{600} = 21,7.$$

ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задача 7.1

В схеме простейшего усилителя низкой частоты на транзисторе (рис 7.7) начальное смещение базы в режиме покоя задается током резистора R_6 .

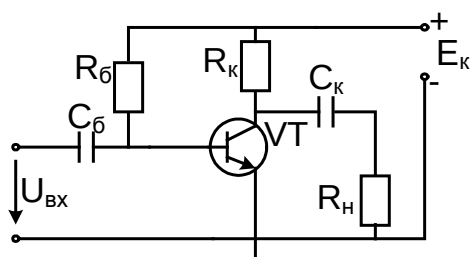


Рис. 7.7.

Даны параметры R_K , E_K , h_{213} . Рассчитать значение R_6 так, чтобы в режиме покоя между коллектором и эмиттером транзистора было задано напряжение U_{K3} .

Таблица 7.1.

Вариант	Данные к задаче 7.1			
	R_K , кОм	E_K , В	h_{213}	U_{K3} , В
1	2	3	4	5
1	1,2	10	35	5
2	5,6	15	80	6
3	4,3	9	15	3
4	2,0	12	45	7
5	1,5	6	30	3
6	2,4	14	50	9
7	1,8	11	25	7,5
8	3,6	8,5	40	2,4
9	1,6	7,5	60	5,1
10	3,2	13	85	4,5
11	7,5	12	65	8
12	8,2	16	50	10,2
13	10,5	12	28	4,4
14	12,0	16	65	11,4
15	9,5	12	40	7,4
16	4,8	8,6	25	2,6
17	10,2	11,8	80	4,5
18	8,6	14	55	7,5
19	6,3	10,5	35	5,4
20	5,6	9	42	4,7

Задача 7.2

В схеме транзистора ключа (рис. 7.8) даны сопротивление резистора R_K

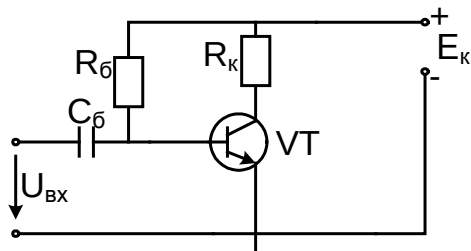


Рис. 7.8.

и значение параметра $h_{21э}$ транзистора, а также напряжение питания E_K . Рассчитать значение R_6 так, чтобы в отсутствие входных сигналов транзистор находился в насыщении с коэффициентом насыщения $S_{нас}$. Найти ток коллектора.

Таблица 7.2.

Вариант	Данные к задаче 7.2			
	$R_K, \text{кОм}$	$h_{21э}$	$S_{нас}$	$E_K, \text{В}$
1	2	3	4	5
1	2,0	50	1,5	10
2	3,2	40	1,25	8,5
3	5,4	30	2,1	12,5
4	1,5	15	2,5	9
5	2,5	80	1,7	11,8
6	1,25	45	1,35	10,5
7	3,5	25	1,9	7,5
8	2,7	18	1,6	6
9	4,5	85	2,25	14
10	1,8	28	1,4	16
11	10,5	45	1,55	9,6
12	12	35	2,7	10,4
13	9,6	70	3,2	12
14	7,4	85	1,45	10,2
15	8,2	120	1,8	9,6
16	13	40	2,25	8,8
17	10,2	55	3,2	13,6
18	4,5	30	2,8	8,4
19	5,6	55	2,4	16,5
20	6,4	75	3,4	14,8

Задача 7.3

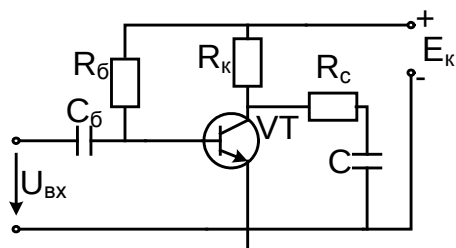


Рис. 7.9.

В схеме рисунка 7.9. транзистор находится в состоянии насыщения, а конденсатор C разряжен. Даны значения $R_к$, C , t_1 , $R_с$, $E_к$. В момент времени $t=0$ транзистор запирается отрицательным импульсом длительностью t_1 , а затем вновь входит в состояние

насыщения. Написать формулу, в соответствии с которой изменяется напряжение на конденсаторе, когда транзистор не пропускает ток. Найти напряжение на конденсаторе в момент времени $t=t_1$. Написать формулу, в соответствии с которой изменяется напряжение на конденсаторе при $t \geq t_1$. Начертить график зависимости напряжения на конденсаторе от времени.

Таблица 7.3

Вариант	Данные к задаче 7.3				
	$R_к$, кОм	C , мкФ	t_1 , мс	$R_с$, кОм	$E_к$, В
1	2	3	4	5	6
1	5,1	0,1	1,5	0,5	12
2	8,0	0,05	0,5	0,45	10
3	7,5	0,03	0,2	0,65	15
4	3,2	0,15	0,75	0,8	11,5
5	2,5	1,0	1,5	0,75	10
6	4,5	0,2	2,0	0,55	9,4
7	4,0	0,35	1,5	0,5	13,2
8	6,0	0,02	0,2	0,45	12
9	10,0	0,33	2,5	0,6	17,5
10	5,6	0,35	3,0	0,82	7,6
11	4,4	1,5	8,0	1,4	14
12	2,5	0,7	3,5	2,8	15
13	8,4	0,04	0,7	5,6	10,5
14	2,8	0,15	0,6	1,5	9,7
15	4,0	0,33	1,5	0,64	10
16	12,5	0,5	10,0	8,4	13

1	2	3	4	5	6
17	5,6	0,04	0,54	2,6	11
18	4,3	0,12	0,8	1,5	10
19	3,2	0,22	0,6	2,4	8
20	2,8	0,5	0,9	0,68	9

Задача 7.4

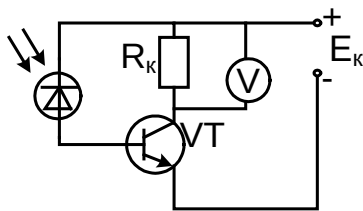


Рис. 7.10.

В схеме, изображенной на рисунке 7.10 на фотодиод с чувствительностью S_1 попадает световой поток Φ , в результате чего показание вольтметра изменилось на ΔU . Рассчитать световой поток. Значения S_1 , ΔU , $h_{21э}$, R_k приведены в таблице 7.4.

Таблица 7.4.

Вариант	Данные к задаче 7.4			
	S_1 , мА/лм	ΔU , В	$h_{21э}$	R_k , кОм
1	20	2,0	25	3,0
2	15	3,0	35	3,6
3	10	1,0	70	2,4
4	5	1,5	40	9,2
5	3	1,2	55	5,6
6	8	0,5	15	2,4
7	12	0,75	45	6,2
8	18	2,5	60	10,5
9	6	1,1	80	9,6
10	10	0,8	30	7,5
11	12	1,7	55	9,8
12	18	2,4	65	12,4
13	16	0,75	60	11,4
14	9	0,66	80	13,0
15	10	1,55	40	10,0
16	8	0,68	50	9,5
17	15	2,35	65	8,8
18	7,5	1,38	45	22,0
19	6,5	0,88	35	18,0
20	12,5	1,33	75	15,0

Задача 7.5

Усилитель на транзисторе по схеме ОЭ охвачен отрицательной обратной связью с коэффициентом β_{OC} . Рассчитать коэффициент усиления по напряжению, если даны параметры транзистора $h_{11э}$, $h_{21э}$, $h_{22э}$, а также сопротивления коллекторной нагрузки R_K и полезной нагрузки R_H .

Таблица 7.5

Вариант	Данные к задаче 7.5					
	β_{OC}	$H_{11э}$	$h_{21э}$	$h_{22э}$	R_K , кОм	R_H , кОм
1	0,1	500	85	$5 \cdot 10^{-5}$	2,2	1,4
2	0,04	680	120	$6 \cdot 10^{-5}$	3,6	0,9
3	0,15	950	100	$9 \cdot 10^{-5}$	8,4	12,0
4	0,08	1100	65	$4 \cdot 10^{-5}$	4,5	1,3
5	0,18	750	90	$7 \cdot 10^{-5}$	5,0	4,2
6	0,03	540	45	$12 \cdot 10^{-5}$	3,3	0,6
7	0,02	670	35	$8 \cdot 10^{-5}$	2,4	0,5
8	0,04	860	96	$14 \cdot 10^{-5}$	8,5	1,8
9	0,06	1200	130	$7 \cdot 10^{-5}$	3,2	4,1
10	0,05	700	63	$4 \cdot 10^{-5}$	1,5	1,2
11	0,06	980	88	$7 \cdot 10^{-5}$	4,8	4,2
12	0,02	860	74	$4 \cdot 10^{-5}$	3,8	15,0
13	0,07	580	97	$6 \cdot 10^{-5}$	9,6	5,3
14	0,04	890	110	$9 \cdot 10^{-5}$	10,0	4,8
15	0,06	790	125	$5 \cdot 10^{-5}$	9,0	16,0
16	0,04	1100	76	$8 \cdot 10^{-5}$	5,4	13,0
17	0,03	640	80	$6 \cdot 10^{-5}$	4,4	15,5
18	0,01	580	38	$4 \cdot 10^{-5}$	6,8	20,0
19	0,06	880	95	$4 \cdot 10^{-5}$	9,5	10,4
20	0,04	940	88	$5 \cdot 10^{-5}$	4,8	8,6

Задача 7.6

В схеме транзисторного усилителя низкой частоты с общим эмиттером, заданы параметры $h_{11э}$, $h_{21э}$ и $h_{22э}$, транзистора сопротивления R_K , R_H , а также напряжение входного сигнала $U_{вх}$. Рассчитать напряжение выходного сигнала $U_{вых}$.

Таблица 7.6

Вариант	Данные к задаче 7.6					
	h_{113}	h_{213}	h_{223}	$R_H,$ кОм	$R_K,$ кОм	$U_{BX}, В$
1	700	40	$4 \cdot 10^{-5}$	8	3,8	2
2	1100	85	$6 \cdot 10^{-5}$	5,5	4,2	3,8
3	550	200	$7 \cdot 10^{-5}$	4,8	3,2	6
4	640	55	$12 \cdot 10^{-5}$	6	5	14
5	980	80	$8 \cdot 10^{-5}$	3	4,8	0,8
6	860	120	$5 \cdot 10^{-5}$	5	10	1,2
7	1000	90	$9 \cdot 10^{-5}$	4	8	3
8	540	100	$4 \cdot 10^{-5}$	3,5	3,6	2,4
9	950	60	$11 \cdot 10^{-5}$	6	5,4	28
10	880	110	$7 \cdot 10^{-5}$	3,8	4,2	12
11	660	75	$6 \cdot 10^{-5}$	4,6	6,4	5,5
12	1200	125	$5 \cdot 10^{-5}$	12	8,5	8,4
13	750	45	$4 \cdot 10^{-5}$	50	12	11
14	920	60	$9 \cdot 10^{-5}$	14	4,4	24
15	800	85	$7 \cdot 10^{-5}$	18	5,6	15
16	680	130	$8 \cdot 10^{-5}$	4,5	7,5	6
17	1050	50	$5 \cdot 10^{-5}$	33	4,6	50
18	580	35	$4 \cdot 10^{-5}$	15	3,7	60
19	900	95	$6 \cdot 10^{-5}$	5	2,8	14
20	840	105	$9 \cdot 10^{-5}$	4,4	10	5

Тестовые задания для самоконтроля

Тема: Основы электроники

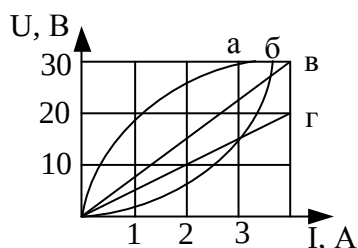
Тест 7.1

1. Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с двумя выводами и одним.....

1. р-п переходом;
2. кристаллом с п-типом проводимости;
3. кристаллом с р-типом проводимости;
4. управляющим с электродом.

2. На рисунке представлены вольт-амперные характеристики приемников,

из них нелинейные элементы.....



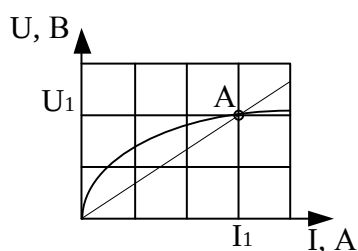
1. а, б;
2. б, в, г;
3. в, г;
4. все.

3. На рисунке приведено условное обозначение



1. полевого транзистора;
2. биполярного транзистора;
3. тиристора;
4. выпрямительного диода.

4. Статическое сопротивление нелинейного элемента в точке А определяется выражением.....



1. $R_{\text{стат}} = \frac{dU_1}{dI_1}$;
2. $R_{\text{стат}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg}(90 - \alpha)$;
3. $R_{\text{стат}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg}(180 - \alpha)$;
4. $R_{\text{стат}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha$.

5. Чтобы через р-п-переход протекал электрический ток к нему необходимо.....

1. приложить внешнее поле;
2. приложить входное напряжение;
3. приложить прямое напряжение;
4. приложить обратное напряжение.

Тест 7.2

1. Нелинейные свойства полупроводниковых приборов используются в различных устройствах.....

1. электротехники;
2. автоматики;
3. радиотехники;
4. во всех выше перечисленных.

2. Электрическая цепь, у которой электрические напряжения и электрические токи связаны друг с другом нелинейными зависимостями, называется....

1. принципиальной схемой;
2. линейной электрической цепью;
3. схемой замещения;
4. нелинейной электрической цепью.

3. Что называется зависимостью тока через электроно-дырочный переход от приложенного напряжения?

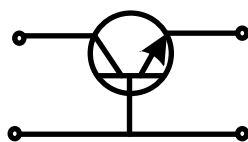
1. вольт-амперной характеристикой;
2. кулон-вольтной характеристикой;
3. потенциальным барьером;
4. вебер-амперной характеристикой.

4. На рисунке приведено условное обозначение



1. полевого транзистора;
2. биполярного транзистора;
3. диодного тиристора;
4. выпрямительного диода.

5. На рисунке приведена схема включения транзистора с общей(им)



1. базой;
2. эмиттером;
3. коллектором;
4. землей.

Таблица ответов на тестовые задания по самоконтролю

номер теста	Ответы на тесты				
	1	2	3	4	5
1.1	1	2	2	1	3
1.2	2	2	2	2	3
2.1	3	2	4	4	2
2.2	1	4	2	4	2
3.1	3	3	2	3	3
3.2	1	1	1	2	3
4.1	2	2	1	3	4
4.2	2	1	1	2	4
5.1	1	1	1	4	2
5.2	3	4	4	2	1
6.1	2	2	4	4	1
6.2	4	4	2	1	3
7.1	1	1	4	4	1
7.2	4	4	1	3	1

**Вариант контрольной работы выбирается по двум последним
цифрам зачетной книжки**

Вариант	Номер задания						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1.1(1)	1.6(1)	2.1(1)	3.1(1)	4.1(1)	5.1(1)	6.1(1)
2	1.1(2)	1.6(2)	2.1(2)	3.1(2)	4.1(2)	5.1(2)	6.1(2)
3	1.1(3)	1.6(3)	2.1(3)	3.1(3)	4.1(3)	5.1(3)	6.1(3)
4	1.1(4)	1.6(4)	2.1(4)	3.1(4)	4.1(4)	5.1(4)	6.1(4)
5	1.1(5)	1.6(5)	2.1(5)	3.1(5)	4.1(5)	5.1(5)	6.1(5)
6	1.1(6)	1.6(6)	2.1(6)	3.1(6)	4.1(6)	5.1(6)	6.1(6)
7	1.1(7)	1.6(7)	2.1(7)	3.1(7)	4.1(7)	5.1(7)	6.1(7)
8	1.1(8)	1.6(8)	2.1(8)	3.1(8)	4.1(8)	5.1(8)	6.1(8)
9	1.1(9)	1.6(9)	2.1(9)	3.1(9)	4.1(9)	5.1(9)	6.1(9)
10	1.1(10)	1.6(10)	2.1(10)	3.1(10)	4.1(10)	5.1(10)	6.1(10)
11	1.1(11)	1.6(11)	2.1(11)	3.1(11)	4.1(11)	5.1(11)	6.1(11)
12	1.1(12)	1.6(12)	2.1(12)	3.1(12)	4.1(12)	5.1(12)	6.1(12)
13	1.1(13)	1.6(13)	2.1(13)	3.1(13)	4.1(13)	5.1(13)	6.1(13)
14	1.1(14)	1.6(14)	2.1(14)	3.1(14)	4.1(14)	5.1(14)	6.1(14)
15	1.1(15)	1.6(15)	2.1(15)	3.1(15)	4.1(15)	5.1(15)	6.1(15)
16	1.1(16)	1.6(16)	2.1(16)	3.1(16)	4.1(16)	5.1(16)	6.1(16)
17	1.1(17)	1.6(17)	2.1(17)	3.1(17)	4.1(17)	5.1(17)	6.1(17)
18	1.1(17)	1.6(17)	2.1(17)	3.1(17)	4.1(17)	5.1(17)	6.1(17)
19	1.1(19)	1.6(19)	2.1(19)	3.1(19)	4.1(19)	5.1(19)	6.1(19)
20	1.1(20)	1.6(20)	2.1(20)	3.1(20)	4.1(20)	5.1(20)	6.1(20)
21	1.2(1)	1.7(1)	2.2(1)	3.2(1)	4.2(1)	5.2(1)	6.1(21)
22	1.2(2)	1.7(2)	2.2(2)	3.2(2)	4.2(2)	5.2(2)	6.1(22)
23	1.2(3)	1.7(3)	2.2(3)	3.2(3)	4.2(3)	5.2(3)	6.1(23)

24	1.2(4)	1.7(4)	2.2(4)	3.2(4)	4.2(4)	5.2(4)	6.1(24)
25	1.2(5)	1.7(5)	2.2(5)	3.2(5)	4.2(5)	5.2(5)	6.1(25)
26	1.2(6)	1.7(6)	2.2(6)	3.2(6)	4.2(6)	5.2(6)	6.1(26)
27	1.2(7)	1.7(7)	2.2(7)	3.2(7)	4.2(7)	5.2(7)	6.1(27)
28	1.2(8)	1.7(8)	2.2(8)	3.2(8)	4.2(8)	5.2(8)	6.1(28)
29	1.2(9)	1.7(9)	2.2(9)	3.2(9)	4.2(9)	5.2(9)	6.1(29)
30	1.2(10)	1.7(10)	2.2(10)	3.2(10)	4.2(10)	5.2(10)	6.1(30)
31	1.2(11)	1.7(11)	2.2(11)	3.2(11)	4.2(11)	5.2(11)	6.2(1)
32	1.2(12)	1.7(12)	2.2(12)	3.2(12)	4.2(12)	5.2(12)	6.2(2)
33	1.2(13)	1.7(13)	2.2(13)	3.2(13)	4.2(13)	5.2(13)	6.2(3)
34	1.2(14)	1.7(14)	2.2(14)	3.2(14)	4.2(14)	5.2(14)	6.2(4)
35	1.2(15)	1.7(15)	2.2(15)	3.2(15)	4.2(15)	5.2(15)	6.2(5)
36	1.2(16)	1.7(16)	2.2(16)	3.2(16)	4.2(16)	5.2(16)	6.2(6)
37	1.2(17)	1.7(17)	2.2(17)	3.2(17)	4.2(17)	5.2(17)	6.2(7)
38	1.2(18)	1.7(18)	2.2(18)	3.2(18)	4.2(18)	5.2(18)	6.2(8)
39	1.2(19)	1.7(19)	2.2(19)	3.2(19)	4.2(19)	5.2(19)	6.2(9)
40	1.2(20)	1.7(20)	2.2(20)	3.2(20)	4.2(20)	5.2(20)	6.2(10)
41	1.3(1)	1.8(1)	2.3(1)	3.3(1)	4.3(1)	5.3(1)	6.2(11)
42	1.3(2)	1.8(2)	2.3(2)	3.3(2)	4.3(2)	5.3(2)	6.2(12)
43	1.3(3)	1.8(3)	2.3(3)	3.3(3)	4.3(3)	5.3(3)	6.2(13)
44	1.3(4)	1.8(4)	2.3(4)	3.3(4)	4.3(4)	5.3(4)	6.2(14)
45	1.3(5)	1.8(5)	2.3(5)	3.3(5)	4.3(5)	5.3(5)	6.2(15)
46	1.3(6)	1.8(6)	2.3(6)	3.3(6)	4.3(6)	5.3(6)	6.2(16)
47	1.3(7)	1.8(7)	2.3(7)	3.3(7)	4.3(7)	5.3(7)	6.2(17)
48	1.3(8)	1.8(8)	2.3(8)	3.3(8)	4.3(8)	5.3(8)	6.2(18)
49	1.3(9)	1.8(9)	2.3(9)	3.3(9)	4.3(9)	5.3(9)	6.2(19)
50	1.3(10)	1.8(10)	2.3(10)	3.3(10)	4.3(10)	5.3(10)	6.2(20)

51	1.3(11)	1.8(11)	2.3(11)	3.3(11)	4.3(11)	5.3(11)	6.2(21)
52	1.3(12)	1.8(12)	2.3(12)	3.3(12)	4.3(12)	5.3(12)	6.2(22)
53	1.3(13)	1.8(13)	2.3(13)	3.3(13)	4.3(13)	5.3(13)	6.2(23)
54	1.3(14)	1.8(14)	2.3(14)	3.3(14)	4.3(14)	5.3(14)	6.2(24)
55	1.3(15)	1.8(15)	2.3(15)	3.3(15)	4.3(15)	5.3(15)	6.2(25)
56	1.3(16)	1.8(16)	2.3(16)	3.3(16)	4.3(16)	5.3(16)	6.2(26)
57	1.3(17)	1.8(17)	2.3(17)	3.3(17)	4.3(17)	5.3(17)	6.2(27)
58	1.3(18)	1.8(18)	2.3(18)	3.3(18)	4.3(18)	5.3(18)	6.2(28)
59	1.3(19)	1.8(19)	2.3(19)	3.3(19)	4.3(19)	5.3(19)	6.2(29)
60	1.3(20)	1.8(20)	2.3(20)	3.3(20)	4.3(20)	5.3(20)	6.2(30)
61	1.4(1)	1.9(1)	2.4(1)	3.4(1)	4.4(1)	5.4(1)	6.2(31)
62	1.4(2)	1.9(2)	2.4(2)	3.4(2)	4.4(2)	5.4(2)	6.2(32)
63	1.4(3)	1.9(3)	2.4(3)	3.4(3)	4.4(3)	5.4(3)	6.2(33)
64	1.4(4)	1.9(4)	2.4(4)	3.4(4)	4.4(4)	5.4(4)	6.2(34)
65	1.4(5)	1.9(5)	2.4(5)	3.4(5)	4.4(5)	5.4(5)	6.2(35)
66	1.4(6)	1.9(6)	2.4(6)	3.4(6)	4.4(6)	5.4(6)	6.2(36)
67	1.4(7)	1.9(7)	2.4(7)	3.4(7)	4.4(7)	5.4(7)	6.2(37)
68	1.4(8)	1.9(8)	2.4(8)	3.4(8)	4.4(8)	5.4(8)	6.2(38)
69	1.4(9)	1.9(9)	2.4(9)	3.4(9)	4.4(9)	5.4(9)	6.2(39)
70	1.4(10)	1.9(10)	2.4(10)	3.4(10)	4.4(10)	5.4(10)	6.2(40)
71	1.4(11)	1.9(11)	2.4(11)	3.4(11)	4.4(11)	5.4(11)	6.2(41)
72	1.4(12)	1.9(12)	2.4(12)	3.4(12)	4.4(12)	5.4(12)	6.2(42)
73	1.4(13)	1.9(13)	2.4(13)	3.4(13)	4.4(13)	5.4(13)	6.2(43)
74	1.4(14)	1.9(14)	2.4(14)	3.4(14)	4.4(14)	5.4(14)	6.2(44)
75	1.4(15)	1.9(15)	2.4(15)	3.4(15)	4.4(15)	5.4(15)	6.2(45)
76	1.4(16)	1.9(16)	2.4(16)	3.4(16)	4.4(16)	5.4(16)	6.2(46)
77	1.4(17)	1.9(17)	2.4(17)	3.4(17)	4.4(17)	5.4(17)	6.2(47)

78	1.4(18)	1.9(18)	2.4(18)	3.4(18)	4.4(18)	5.4(18)	6.2(48)
79	1.4(19)	1.9(19)	2.4(19)	3.4(19)	4.4(19)	5.4(19)	6.2(49)
80	1.4(20)	1.9(20)	2.4(20)	3.4(20)	4.4(20)	5.4(20)	6.2(50)
81	1.5(1)	1.10(1)	2.6(1)	3.5(1)	4.5(1)	5.5(1)	6.3(1)
82	1.5(2)	1.10(2)	2.6 (2)	3.5(2)	4.5(2)	5.5(2)	6.3(2)
83	1.5(3)	1.10(3)	2.6 (3)	3.5(3)	4.5(3)	5.5(3)	6.3(3)
84	1.5(4)	1.10(4)	2.6 (4)	3.5(4)	4.5(4)	5.5(4)	6.3(4)
85	1.5(5)	1.10(5)	2.6(5)	3.5(5)	4.5(5)	5.5(5)	6.3(5)
86	1.5(6)	1.10(6)	2.6(6)	3.5(6)	4.5(6)	5.5(6)	6.3(6)
87	1.5(7)	1.10(7)	2.6(7)	3.5(7)	4.5(7)	5.5(7)	6.3(7)
88	1.5(8)	1.10(8)	2.6(8)	3.5(8)	4.5(8)	5.5(8)	6.3(8)
89	1.5(9)	1.10(9)	2.6(9)	3.5(9)	4.5(9)	5.5(9)	6.3(9)
90	1.5(10)	1.10(10)	2.6(10)	3.5(10)	4.5(10)	5.5(10)	6.3(10)
91	1.5(11)	1.10(11)	2.6(11)	3.5(11)	4.5(11)	5.5(11)	6.3(11)
92	1.5(12)	1.10(12)	2.6(12)	3.5(12)	4.5(12)	5.5(12)	6.3(12)
93	1.5(13)	1.10(13)	2.6(13)	3.5(13)	4.5(13)	5.5(13)	6.3(13)
94	1.5 (14)	1.10(14)	2.6 (14)	3.5 (14)	4.5 (14)	5.5(14)	6.3(14)
95	1.5(15)	1.10(15)	2.6(15)	3.5(15)	4.5(15)	5.5(15)	6.3(15)
96	1.5(16)	1.10(16)	2.6(16)	3.5(16)	4.5(16)	5.5(16)	6.3(16)
97	1.5(17)	1.10(17)	2.6(17)	3.5(17)	4.5(17)	5.5(17)	6.3(17)
98	1.5(18)	1.10(18)	2.6(18)	3.5(18)	4.5(18)	5.5(18)	6.3(18)
99	1.5(19)	1.10(19)	2.6(19)	3.5(19)	4.5(19)	5.5(19)	6.3(19)
00	1.5(20)	1.10(20)	2.6(20)	3.5(20)	4.5(20)	5.5(20)	6.3(20)

Примечание: В таблице первой цифрой указан № задачи, в скобках вариант задачи, пример 1.1 (1) – задача 1.1. вариант 1

Список литературы

1. Алиев, И.И. Справочник по электротехнике: 4-е изд., перераб. и доп./ справочник. – Ростов н/Д: Феникс, 2003. – 480 с.
2. Данилов И.А. Общая электротехника: учебн. пособие/ И.А. Данилов – М.: «Высшее образование», 2009. – 673 с.
3. Задачник по электротехнике: учеб. пособие/ П.Н. Новиков, В.Я. Кауфман, О.В.Толчеев [и др.] – 2-е изд., стереотип. – М.: ИРПО; изд. Центр «Академия», 1999. – 336 с.
4. Иванов, И.И. Электротехника: учебник/ И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.С. Радовников: 4-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2006. – 496 с.
5. Касаткин, А.С. Электротехника: учеб. для вузов/А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 8-е изд., испр. – М: Издательский центр «Академия», 2003. -544 с.
6. Практикум по электротехнике и электронике. Уч. пособие для вузов/Кононенко В.В., Мишкович В.И., Муханов В.В., Планидин В.Ф., Чеголин П.М./ под ред. В.В. Кононенко – Ростов н/Д: Феникс, 2007.- 384 с.
7. Рекус, Г.Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники/ Г.Г.Рекус, А.И. Белоусов: учеб. пособие для неэлектротехнических спец. вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2001. – 416 с.
8. Электротехника и электроника: учебное пособие для вузов/ В.В. Кононенко, В.И. Мишкович, В.В. Муханов [и др.]; под ред. В.В. Кононенко. – изд. 4-е – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 779 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1*Пример оформления титульного листа*

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

по дисциплине «*ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА*»

Вариант №_____

Выполнил(а): (_____) (и.о. фамилия,
специальность,
номер группы,
номер зачетной
книжки)

Дата сдачи: _____

Подпись: _____

Проверил: (_____) (и.о. фамилия,
должность,
ученая степень)

Благовещенск, 2012

Содержание

Правила оформления контрольной работы.....	3
1 Электрические цепи постоянного тока.....	4
1.1 Закон Ома. Сопротивление.....	4
1.2 Энергия и мощность электрической цепи.....	5
1.3 Закон Джоуля-Ленца.....	6
1.4 Последовательное, параллельное и смешанное соединение резисторов.....	6
1.5 Первый закон Кирхгофа	7
1.6 Второй закон Кирхгофа	7
ПРИМЕР 1	8
ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	17
Тестовые задания для самоконтроля №1	27
2 Переменный электрический ток.....	29
2.1 Однофазные электрические цепи.....	32
2.1.1 Цепь переменного тока с активным сопротивлением.....	32
2.1.2 Цепь переменного тока с индуктивностью.....	33
2.1.3 Цепь переменного тока с емкостью.....	34
ПРИМЕР 2	35
ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	42
Тестовые задания для самоконтроля №2	49
3. Трехфазные электрические цепи.....	51
3.1 Трехфазная система. Источник трехфазного напряжения.....	51
3.2 Соединение обмоток генератора и приемника в звезду.....	51
3.3 Соединение обмоток генератора и приемников энергии в треугольник.....	54
ПРИМЕР 3	56
ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	61
Тестовые задания для самоконтроля №3	69
4 Трансформаторы.....	71
4.1 Однофазные трансформаторы.....	71
4.2 Трехфазные трансформаторы.....	72
4.3 Измерительные трансформаторы.....	73
ПРИМЕР 4	73

ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	75
Тестовые задания для самоконтроля №4	82
5 Электрические машины.....	84
5.1 Машины постоянного тока.....	84
ПРИМЕР 5	87
ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	89
Тестовые задания для самоконтроля №5	97
6 Электрические машины переменного тока.....	99
6.1 Асинхронные машины.....	99
6.2 Синхронные машины.....	104
ПРИМЕР 6	105
ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	107
Тестовые задания для самоконтроля №6	112
7 Основы электроники.....	114
7.1 Биполярный транзистор.....	114
7.1.1 Схема с общей базой (ОБ).....	115
7.1.2 Схема с общим эмиттером (ОЭ).....	116
7.1.3 Схема с общим коллектором (ОК).....	118
7.2 Электронные устройства.....	118
7.3 Электронные усилители.....	120
ПРИМЕР 7.....	123
ЗАДАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	124
Тестовые задания для самоконтроля №7.....	130
Таблица ответов на тестовые задания по самоконтролю.....	132
Варианты заданий для контрольных работ.....	133
Список литературы.....	137
Приложение.....	138
Содержание.....	139