

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

---

**Казанский государственный  
энергетический университет  
Кафедра ТОЭ**

**Методические указания**  
к выполнению контрольного задания № 1  
для студентов-заочников  
электроэнергетических специальностей

Казань 2015

УДК  
ББК  
М

Теоретические основы электротехники. Контрольная работа №1 для студентов-заочников электроэнергетических специальностей. Н.А. Тарасова, Ю.Н. Ерашова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – 21 с.

Приведены общие сведения по теории расчета электрических цепей постоянного и синусоидального тока с примерами решения задач. Даны рекомендации по выполнению контрольной работы. Представлены варианты контрольных заданий.

Пособие предназначено для студентов-заочников электроэнергетических специальностей по направлениям 140200, 140600 и 210100.

© Тарасова Н. А., Ерашова Ю. Н., Тагиров Ш.Ф., 2007

© Казанский государственный энергетический университет, 2008

# 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## Общие сведения

Электрической цепью называют совокупность источников электрической энергии, преобразователей, потребителей, коммутационной, защитной и измерительной аппаратуры, соединительных проводов и линии электропередачи. Графическое изображение электрической цепи называется схемой. На рис. 1.1 показаны условные изображения пассивных элементов (резистор  $R$ , катушка индуктивности  $L$ , конденсатор  $C$ ) и активных элементов (источник ЭДС  $E$  и источник тока  $I$ ).

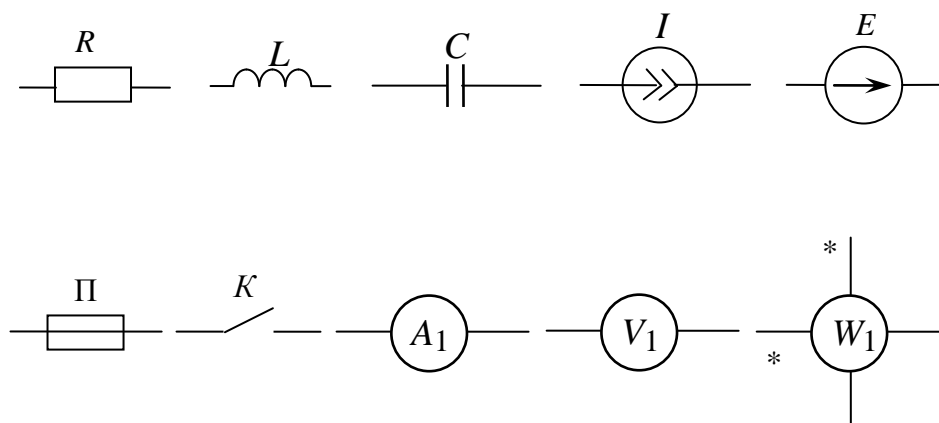


Рис. 1.2

На рис. 1.2 показаны предохранитель  $\Pi$ , ключ  $K$ , амперметр, вольтметр и ваттметр.

Если размеры элемента не влияют на его характеристики, то его называют элементом с сосредоточенными параметрами, иначе – элементом с распределенными параметрами.

Линейный элемент описывается линейным алгебраическим (дифференциальным) уравнением, нелинейный элемент - нелинейным уравнением. Зависимость между током и напряжением элемента с двумя зажимами называется его вольт-амперной характеристикой.

Положительное направление тока  $I$  указывает его действительное направление, если он положителен. Положительное направление напряжения  $U$  идет от точки высшего потенциала к точке низшего потенциала, когда  $U > 0$ . Положительное направление ЭДС  $E$  указывает точку высшего потенциала, если  $E > 0$  (рис. 1.3).

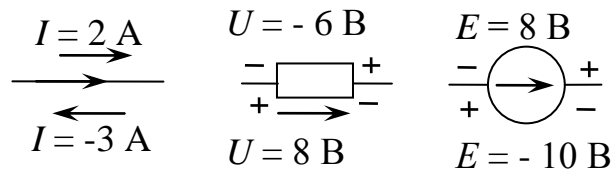


Рис. 1.3

Ветвь – совокупность последовательно соединенных элементов, по которым течет один и тот же ток. Узел – точка схемы, где сходятся три или более ветвей. Контур – совокупность ветвей, при обходе которых совершается замкнутый путь.

Основными являются закон Ома, законы Кирхгофа I и II, закон Джоуля-Ленца.

*Закон Ома* (рис. 1.4а): напряжение между выводами активного сопротивления и ток в сопротивлении связаны соотношениями  $U_R = RI_R$ ;  $I_R = GU_R$ ;  $G = 1/R$ , где  $R$  – активное сопротивление;  $G$  – активная проводимость.

*I закон Кирхгофа*: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю. Для узла на рис. 1.4 б имеем:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

*II закон Кирхгофа*: алгебраическая сумма напряжений на пассивных элементах равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в контуре. Для контура на рис. 1.4 в имеем:

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4 = E_1 - E_3.$$

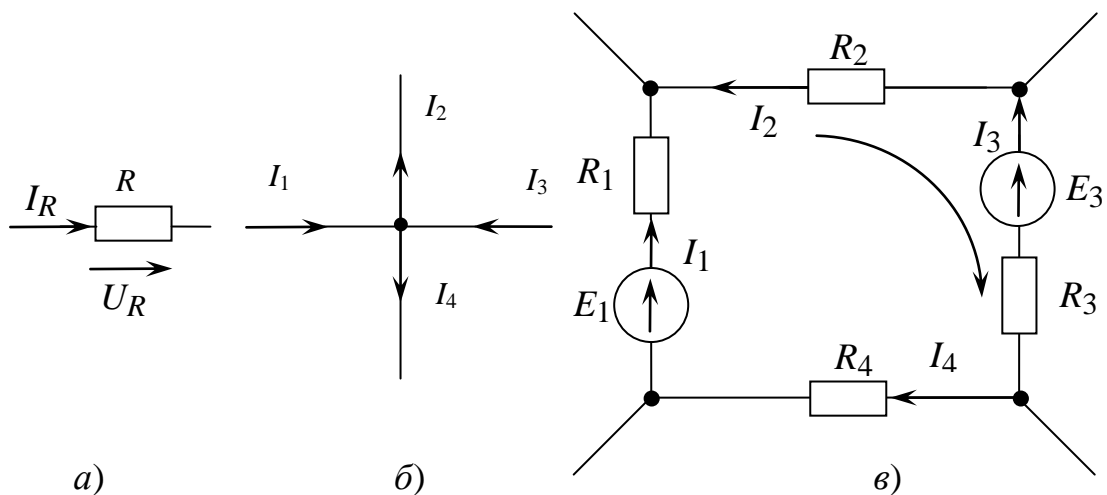


Рис. 1.4

Стрелкой показано направление обхода контура.

Закон Джоуля-Ленца: мощность, выделяемая в резисторе  $R$ , определяется равенством

$$P = RI_R^2 = GU_R^2 = U_R I_R.$$

Мощность источника ЭДС  $P_E = EI$  для двухполюсника  $P = UI$ . Реальный источник ЭДС описывается уравнением

$$U = E - R_0 I = R_H I,$$

где  $R_0$  – его внутреннее сопротивление;  $R_H$  – сопротивление нагрузки.

Он имеет схему замещения и вольт-амперную характеристику, показанные на рис. 1.5.

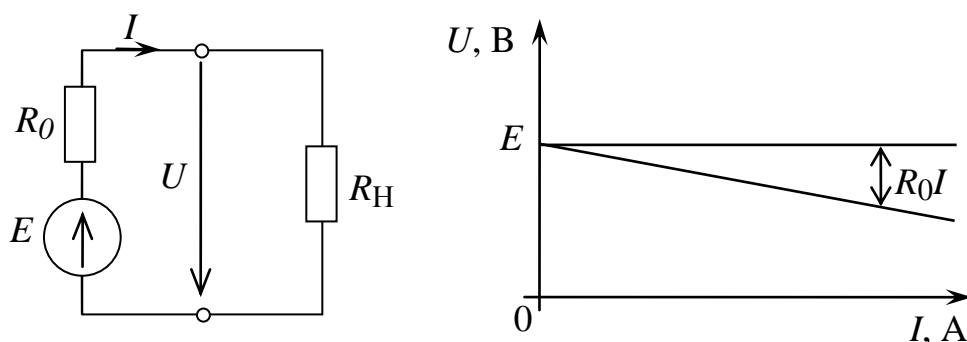


Рис. 1.5

Реальный источник тока описывается уравнением

$$I = I_0 - G_0 U,$$

где  $G_0$  – его внутренняя проводимость. Схема замещения и вольт-амперная характеристика показана на рис. 1.6.

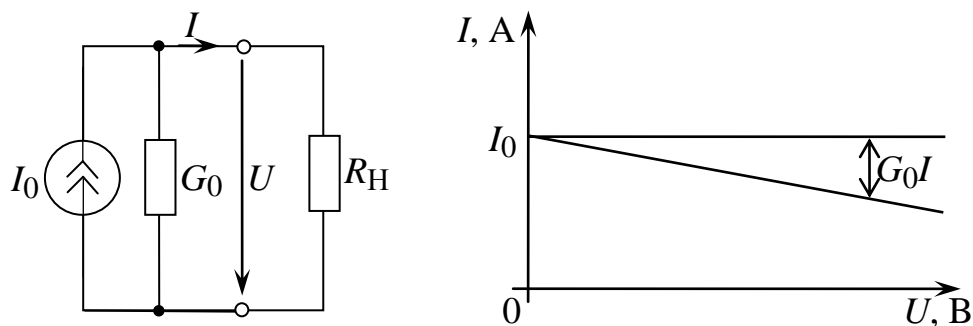


Рис.1.6

Реальный источник ЭДС и реальным источник тока могут быть взаимно преобразованы согласно формулам

$$E = R_0 I_0; G_0 = I/R_0.$$

Максимальная мощность в сопротивлении  $R_H$  выделяется, если  $R_H = R_0$ , или  $R_H = 1/G_0$ .

Цепь постоянного тока с одним источником ЭДС (напряжения) может быть рассчитана методом эквивалентного преобразования цепи. При последовательном соединении элементов (рис. 1.7 а) эквивалентное сопротивление

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + \dots + R_n, I = U/R_{\Sigma}.$$

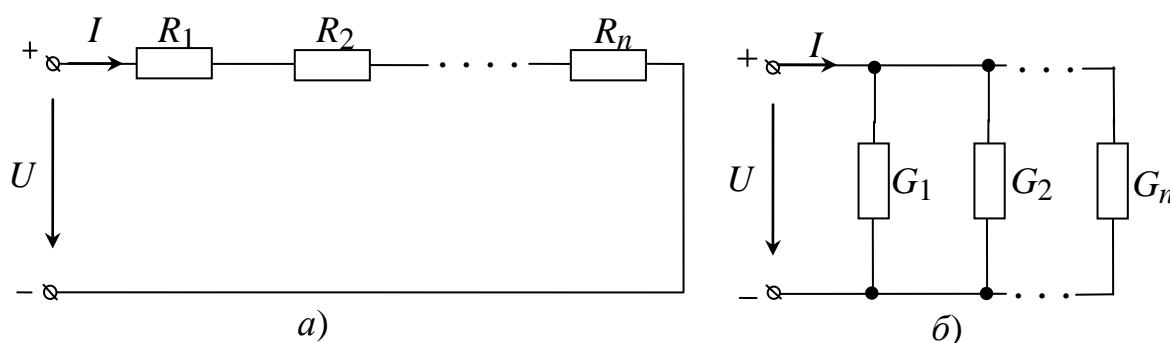


Рис. 1.7

При параллельном соединении элементов (рис. 1.7 б) эквивалентная проводимость

$$G_{\Sigma} = G_1 + G_2 + \dots + G_n, I = G_{\Sigma} U.$$

При параллельном соединении двух сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  эквивалентное сопротивление

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

При смешанном соединении элементов производится ряд преобразований. На рис. 1.8 а-д показаны схемы, получаемые заменой последовательных и параллельных соединенных участков по формулам

$$R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}; R_{3..5} = R_3 + R_{45};$$

$$R_{2..5} = \frac{R_2 R_{3..5}}{R_2 + R_{3..5}}; R_{1..5} = R_1 + R_{2..5}.$$

Далее определяются токи и напряжения к схемам:

$$\partial: I_1 = U/R_{15};$$

$$z: U_{a0} = R_{2..5}I_1;$$

$$e: I_2 = U_{a0}/R_2; I_3 = U_{a0}/R_{3..5};$$

$$b: U_{b0} = R_{45}I_3;$$

$$a: I_4 = U_{b0}/R_4; I_5 = U_{b0}/R_5.$$

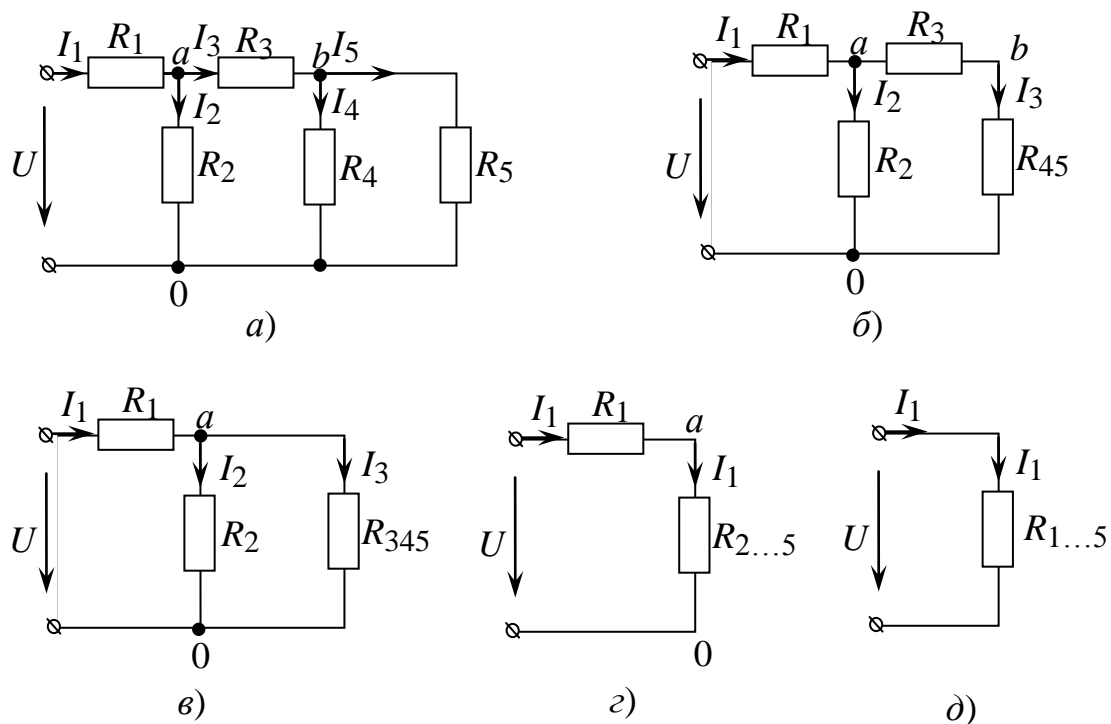


Рис. 1.8

В необходимых случаях выполняется преобразование соединения треугольником и соединение звездой (рис. 1.9 а, б) по формулам:

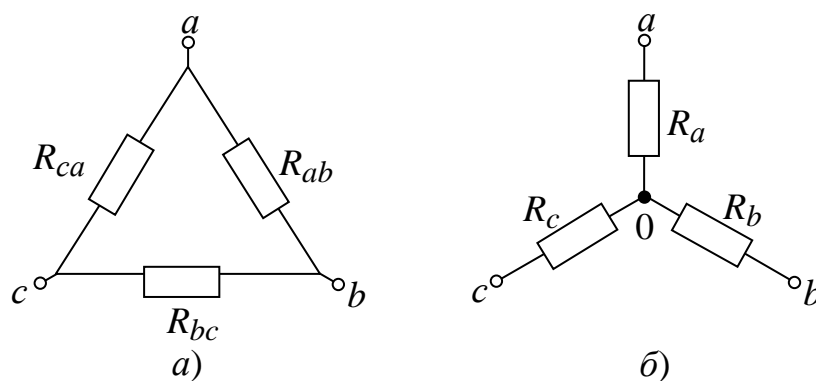


Рис. 1.9

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; R_b = \frac{R_{bc}R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; R_c = \frac{R_{bc}R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}.$$

Цепь с одним источником может быть рассчитана методом пропорциональных величин. Пример на схеме рис. 1.8 а ток  $I_5 = 1$  А. Тогда

$$U'_{b0} = R_5; I_4' = \frac{U'_{b0}}{R_4}; I_3' = I_4' + I_5';$$

$$U'_{d0} = U'_{b0} + R_5 I_3'; I_2' = \frac{U'_{d0}}{R_2}; I_1' = I_2' + I_3'; U' = U'_{d0} + R_1 I_1'.$$

Теперь находим коэффициент  $k = U/U'$ , после чего определяем истинные токи:

$$I_1 = k I_1', I_2 = k I_2', \dots, I_5 = k I_5'.$$

Для расчета разветвленных электрических цепей используется ряд методов, основанных на законах Кирхгофа.

1. Метод непосредственного применения I и II законов Кирхгофа заключается в составлении уравнений  $(q - 1)$  по I закону Кирхгофа и уравнений  $(p - q + 1)$  по II закону Кирхгофа, где  $p$  – число пар ветвей,  $q$  – число узлов. По II закону Кирхгофа записываются уравнения для линейно независимых контуров, когда, например, в каждый новый контур входит хотя бы одна новая ветвь.

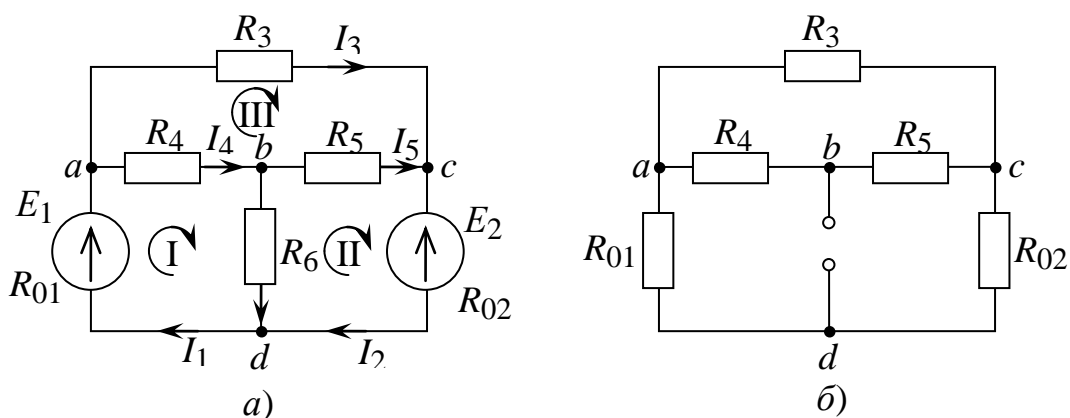


Рис. 1.10

Для цепи на рис. 1.10 имеем уравнения:

по I закону **Кирхгофа**:

узел a:  $I_1 - I_3 - I_4 = 0$ ;

узел b:  $I_4 - I_5 - I_6 = 0$ ;

узел c:  $I_3 - I_2 + I_5 = 0$ ;

по II закону **Кирхгофа**:

контур I:  $R_4 I_4 + R_6 I_6 + R_{01} I_1 = E_1$ ;

контур II:  $R_{02} I_4 + R_5 I_5 - R_6 I_6 = -E_2$ ;



контур III:  $R_3I_3 - R_4I_4 - R_5I_5 = 0$ ;

2. Метод контурных токов предполагает, что в каждом из независимых контуров протекает контурный ток. На схеме рис. 1.10 *a* в контурах I-III протекают токи  $I_I - I_{III}$ . Уравнения по II закону Кирхгофа имеют вид

$$I_I(R_{01} + R_4 + R_6) - I_{II}R_6 - I_{III}R_4 = E_1;$$

$$I_{II}(R_{02} + R_5 + R_6) - I_I R_6 - I_{III}R_5 = -E_2;$$

$$I_{III}(R_3 + R_4 + R_5) - I_I R_4 - I_{II}R_5 = 0.$$

Решив эту систему, найдем токи  $I_I - I_{III}$ , после чего определим токи в ветвях по формулам

$$I_1 = I_I; \quad I_2 = I_{II}; \quad I_3 = I_{III};$$

$$I_4 = I_I - I_{III}; \quad I_5 = I_{II} - I_{III}; \quad I_6 = I_I - I_{II}.$$

3. Метод наложения основан на принципе наложения (суперпозиции): если в цепи действует несколько источников ЭДС и тока, то ток в любой ветви определяется как алгебраическая сумма токов, созданных в этой ветви каждым из источников в отдельности. При этом остальные источники заменяются их внутренними сопротивлениями.

4. Метод узловых напряжений позволяет найти потенциалы всех узлов, кроме одного, потенциал, которого принимается равным нулю. Полагая на схеме рис. 1.10  $\varphi_d = 0$ , получим уравнения:

$$\varphi_a(G_{01} + G_3 + G_4) - \varphi_b G_4 - \varphi_c G_3 = E_1 G_{01},$$

$$\varphi_b(G_4 + G_5 + G_6) - \varphi_a G_4 - \varphi_c G_5 = 0,$$

$$\varphi_c(G_{02} + G_3 + G_5) - \varphi_a G_3 - \varphi_b G_5 = E_2 G_{02},$$

Решив систему уравнений, найдем потенциалы  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ , после чего вычислим токи в ветвях:

Метод двух узлов, как частный случай метода узловых напряжений используется для расчета цепи, содержащей несколько ветвей и два узла или две шины. На рис. 1.11 показана схема с узлами *a* и *b*.

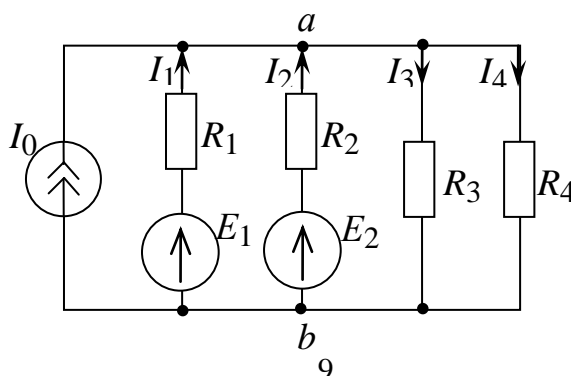


Рис. 1.11

Напряжение между узлами  $U_{ab}$ , определяется по формуле

$$U_{ab} = \frac{I_0 + E_1 G_1 + E_2 G_2}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}; \quad G_1 = \frac{1}{R_1}, \dots, \quad G_4 = \frac{1}{R_4}.$$

Вычислив это напряжение, находим токи в ветвях:

$$I_1 = G_1(E_1 - U_{ab}); \quad I_2 = G_2(E_2 - U_{ab}); \quad I_3 = G_3 U_{ab}; \quad I_4 = G_4 U_{ab}.$$

5. Метод эквивалентного генератора основан па замене активного двухполюсника реальным источником ЭДС. На рис. 1.12 *a* и *б* показана такая замена, а также схемы для опытов холостого хода рис. 1.12 *в* и короткого замыкания рис. 1.12 *г*. По результатам этих опытов можно определить ЭДС эквивалентную генератора  $E_0$  и его внутреннее сопротивление  $R_0$ :

$$E_0 = U_0; \quad R_0 = \frac{U_0}{I_k}.$$

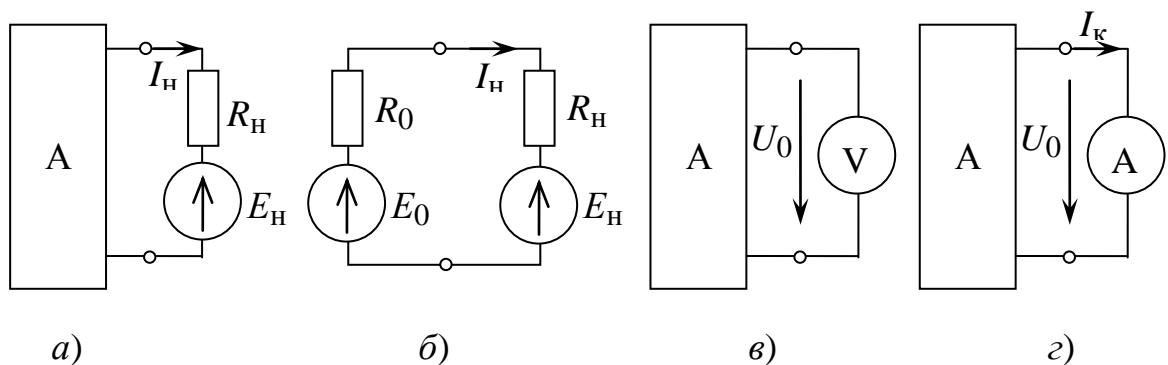


Рис. 1.12

После этого ток в ветви  $E_H, R_H$  определяем по формуле

$$I_H = \frac{E_0 - E_H}{R_0 + R_H}.$$

Ток  $I_6$  в схеме на рис. 1.10 можно найти, рассчитав цепь без ветви  $R_6$ , например, методом узловых потенциалов. Напряжение  $U_{bd}$  равно ЭДС  $E_0$ . Внутреннее сопротивление  $R_0$  определяем как сопротивление между точками  $b$  и  $d$  после удаления ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  (рис. 1,10б). Мостовая схема на рис. 1.13 *a*, которая преобразованием треугольника в звезду превращается в схему рис. 1.13 *б* и в результате дальнейшего преобразования приводится к одному сопротивлению  $R_0$ .

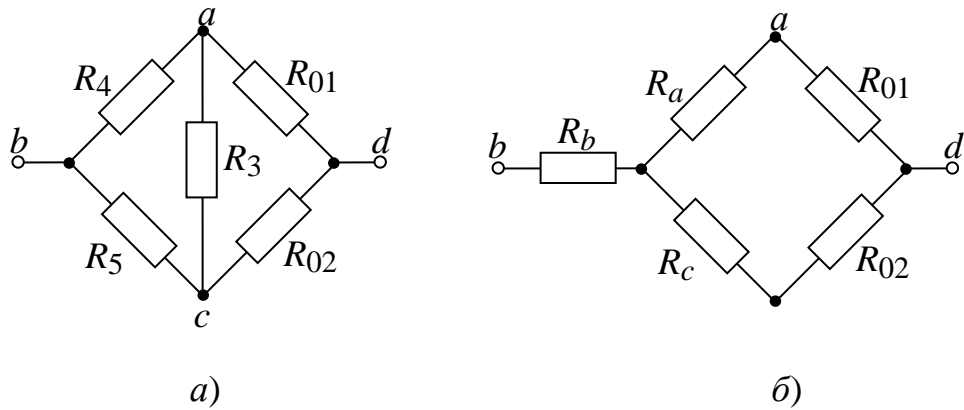


Рис. 1.13

Ток ветви  $I_6$  определяем по формуле  $I_6 = \frac{E_0}{R_0 + R_6}$ .

Балансом мощностей называется равенство суммарной мощности, генерируемой источниками ЭДС и тока, и суммарной мощности, потребляемой всеми резисторами, включая внутреннее сопротивление источников. Например, для схемы на рис. 1.10 должно выполняться равенство

$$E_1 I_1 - E_2 I_2 = R_{01} I_1^2 + R_{02} I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2.$$

### Методические указания к изучению раздела I

При изучении линейной электрической цепи следует учесть, что постоянный ток является частным случаем переменного тока (ток с нулевой частотой является постоянным). Принимая во внимание, что расчет цепи постоянного тока много проще, целесообразно осваивать методики расчета электрической цепи на примере цепи постоянного тока.

Каждый рассматриваемый метод имеет преимущества и недостатки. При выборе пути решения поставленной задачи необходимо учитывать особенности схемы и подбор метода осуществлять с учетом этих особенностей. Так метод преобразования целесообразно применять для схем с единственным источником электрической энергии. Метод контурных токов применяют для сложных многоконтурных схем, в составе которых более одного источника. Для схем с большим количеством ветвей и меньшим количеством узлов рационально использовать метод узловых напряжений. Метод эквивалентного генератора удобен при установлении зависимости между различными параметрами на различных участках цепи. При необходимости рассчитать ток одного участка цепи можно применить метод наложения.

Другими словами к решению задачи необходимо подходить творчески.

### Примеры решения задач

**Задача 1.** Рассмотрим электрическую цепь, изображенную на рис. 1.14.

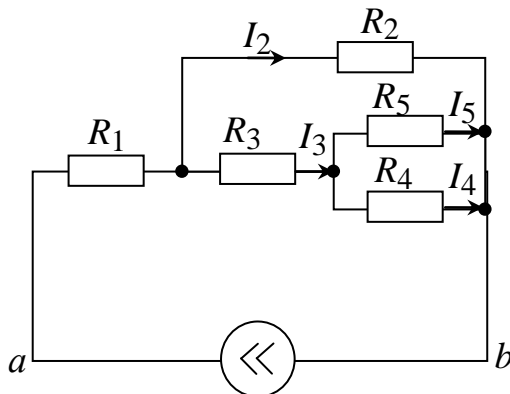


Рис. 1.14

К источнику тока  $I = 0,1$  А подключены резисторы с сопротивлениями  $R_1 = 12$  Ом,  $R_2 = 10$  Ом,  $R_3 = 16$  Ом,  $R_4 = 40$  Ом,  $R_5 = 60$  Ом. Определить эквивалентное сопротивление цепи (входное сопротивление относительно зажимов источника питания), напряжение  $U_{ab}$  источника тока и все токи. Составить баланс мощностей.

#### Решение.

Задача решается методом свертывания схемы.

Находим входное сопротивление  $R_{ab}$  схемы относительно зажимов источника тока :

$$R_{ab} = R_1 + \frac{R_2 \left( R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right)}{R_2 + R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}} = 12 + \frac{10 \left( 16 + \frac{40 \cdot 60}{40 + 60} \right)}{10 + 16 + \frac{40 \cdot 60}{40 + 60}} = 20 \text{ Ом.}$$

Находим напряжение на зажимах источника  $U_{ab}$ :

$$U_{ab} = R_{ab} I = 20 \cdot 0,1 = 2 \text{ В.}$$

По закону Ома находим ток  $I_2$  :

$$I_2 = \frac{U_{ab} - R_1 I}{R_2} = \frac{2 - 0,1 \cdot 12}{10} = 0,08 \text{ А}$$

Ток  $I_3$  определяем из уравнения первого закона Кирхгофа:

$$I_3 = I - I_2 = 0,1 - 0,08 = 0,012 \text{ А.}$$

Этот ток распределяется обратно пропорционально сопротивлениям  $R_4$  и  $R_5$ :

$$I_4 = I_3 \frac{R_5}{R_4 + R_5} = 0,012 \text{ А;}$$

$$I_5 = I_3 \frac{R_4}{R_4 + R_5} = 0,008 \text{ А.}$$

Уравнение баланса мощностей отражает равенство мощностей, отдаваемой источником и расходуемой приемником, т.е.

$$U_{ab}I = R_1 I^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2$$

$$2 \cdot 0,1 = 12 \cdot 0,1^2 + 10 \cdot 0,08^2 + 16 \cdot 0,02^2 + 40 \cdot 0,012^2 + 60 \cdot 0,008^2$$

$$0,2 \text{ Вт} = 0,2 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{И}} = P_{\text{П}} \text{ Вт.}$$

**Задача 2.** Определить токи и составить баланс мощностей для схемы на рис. 1.15, рассчитать ток в ветви  $ab$  методом эквивалентного генератора и напряжение между точками  $a$  и  $b$  для исходной схемы. Дано:  $E_1 = 42 \text{ В}$ ,  $E_2 = 24 \text{ В}$ ,  $R_1 = R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = R_4 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = R_6 = 6 \text{ Ом}$ .

**Решение.**

Схема содержит шесть ветвей ( $m = 6$ ) и четыре узла ( $n = 4$ ). Число уравнений составляемых по методу контурных токов, равно  $m - (n - 1) = 3$ . Зададим произвольное направление контурных токов  $I_{K1}$ ,  $I_{K2}$ ,  $I_{K3}$ , как показано на рис. 1.15. Составим систему уравнений методом контурных токов

$$(R_1 + R_4 + R_6)I_{K1} + R_4 I_{K2} - R_6 I_{K3} = E_1$$

$$R_4 I_{K1} + (R_2 + R_3 + R_4)I_{K2} - R_2 I_{K3} = -E_2$$

$$-R_6 I_{K1} - R_2 I_{K2} + (R_2 + R_5 + R_6)I_{K3} = E_2$$

Подставляя численные значения и решая эти уравнения, найдем контурные токи:  $I_{K1} = 6 \text{ А}$ ,  $I_{K2} = 0,882 \text{ А}$ ,  $I_{K3} = 4,412 \text{ А}$ .

Искомые токи будут равны:

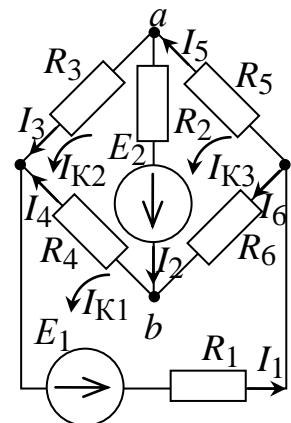


Рис. 1.15

$$I_1 = I_{K1} = 6 \text{ A}, I_2 = I_{K3} - I_{K2} = 3,529 \text{ A}, I_3 = I_{K2} = 0,882 \text{ A},$$

$$I_4 = I_{K1} - I_{K2} = 5,118 \text{ A}, I_5 = I_{K3} = 4,412 \text{ A}, I_6 = I_{K1} - I_{K3} = 1,588 \text{ A}.$$

Составляем баланс мощностей:

$$P_{\text{И}} = E_1 I_1 + E_2 I_2 = 336,7 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{П}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2 = 336,7 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{И}} = P_{\text{П}} = 336,7 \text{ Вт}.$$

Определим ток в ветви  $ab$  методом эквивалентного генератора.

Решение задачи распадается на два этапа.

1. Определим напряжение холостого хода  $U_{\text{ХХ}}$  на зажимах разомкнутой ветви  $ab$ . Схема для этого случая показана на рис. 1.16 а.

Обратимся к закону Ома и рассчитаем напряжение  $U_{cd}$

$$U_{cd} = \frac{E_1}{\frac{(R_3 + R_5)(R_4 + R_6)}{R_3 + R_5 + R_4 + R_6} + R_1} = \frac{42}{\frac{100}{20} + 2} = 6 \text{ В}.$$

Для нахождения  $U_{\text{ХХ}}$  следует найти токи параллельных ветвей  $I_{3\text{ХХ}}$  и  $I_{4\text{ХХ}}$ :

$$I_{3\text{ХХ}} = \frac{U_{cd}}{R_3 + R_5} = \frac{6}{10} = 0,6 \text{ А}$$

$$I_{4\text{ХХ}} = \frac{U_{cd}}{R_4 + R_6} = \frac{6}{10} = 0,6 \text{ А}.$$

$U_{\text{ХХ}}$  найдем по закону Ома

$$U_{\text{ХХ}} = R_3 I_{3\text{ХХ}} - R_4 I_{4\text{ХХ}} = 0 \text{ В}, \text{ т.е. } E_0 = 0$$

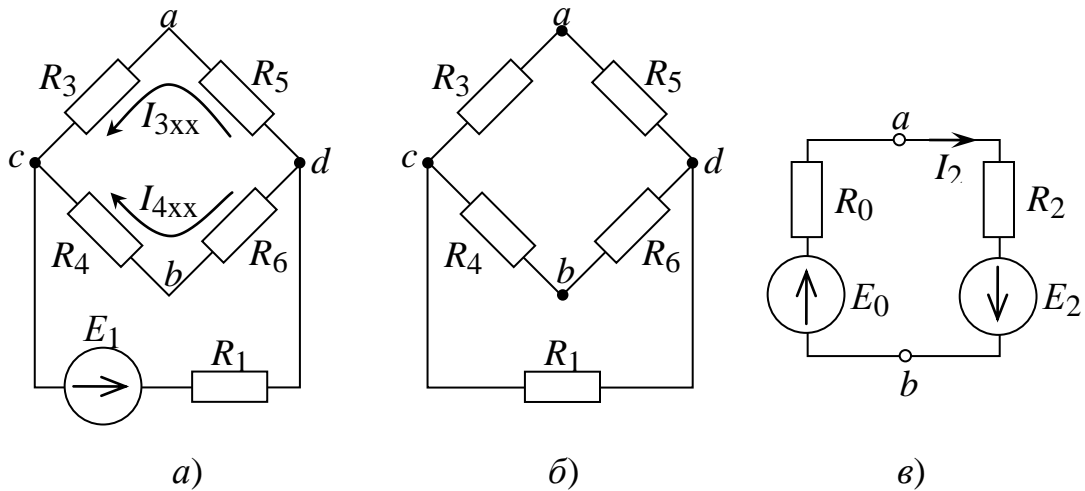


Рис. 1.16

2. Определим эквивалентное сопротивление  $R_0$ . Для этого необходимо закоротить все источники ЭДС. Схема для этого случая показана на рис. 1.16 б. Преобразуем звезду сопротивлений  $R_5, R_6, R_1$  в эквивалентный треугольник, получим:

$$R_{56} = R_5 + R_6 + \frac{R_5 R_6}{R_1} = 30 \text{ Ом},$$

$$R_{15} = R_1 + R_5 + \frac{R_1 R_5}{R_6} = 10 \text{ Ом},$$

$$R_{16} = R_1 + R_6 + \frac{R_1 R_6}{R_5} = 10 \text{ Ом}.$$

$R_3$  параллельно  $R_{15}$ , а  $R_4$  параллельно  $R_{16}$ . Между собой эти две параллельные пары соединены последовательно.

$$R = \frac{R_3 R_{15}}{R_3 + R_{15}} + \frac{R_4 R_{16}}{R_4 + R_{16}} = 5,7 \text{ Ом}$$

Полученное сопротивление  $R$  параллельно сопротивлению  $R_{56}$ .

$$R_0 = \frac{R R_{56}}{R + R_{56}} = 4,8 \text{ Ом}.$$

Ток  $I_2$  определяем по закону Ома для замкнутого контура (см. рис. 1.16

в)

$$I_2 = \frac{E_0 + E_2}{R_0 + R_2} = \frac{24}{4,8 + 2} = 3,53 \text{ А}.$$

**Задача 3** Определить токи и составить баланс мощностей для схемы на рис. 1.17, рассчитать ток в ветви  $ab$  методом эквивалентного генератора и напряжение между точками  $a$  и  $b$  для исходной схемы.

Дано:  $I = 50$  мА,  $E_2 = 60$  В,  $R_1 = 5$  кОм,  $R_2 = 4$  кОм,  $R_3 = 16$  кОм,  $R_4 = 2$  кОм,  $R_5 = 8$  кОм.

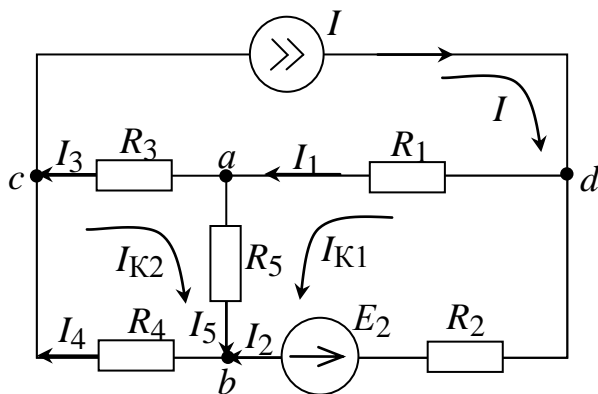


Рис. 1.17

**Решение.**

Схема содержит шесть ветвей ( $m = 6$ ) и четыре узла ( $n = 4$ ). Число уравнений составляемых по методу контурных токов, равно  $m - (n - 1) - 1 = 2$ , так как в схеме имеется источник тока, ток которого может быть принят равным контурному току. Зададим произвольное направление контурных токов  $I_{K1}$ ,  $I_{K2}$  как показано на рис. 1.17. Там же нанесен контурный ток  $I$ . Составим систему уравнений методом контурных токов

$$(R_1 + R_2 + R_5)I_{K1} + R_5 I_{K2} + R_1 I = E_2$$

$$R_5 I_{K1} + (R_3 + R_4 + R_5)I_{K2} - R_3 I = 0.$$

Подставляя численные значения и решая эти уравнения, найдем контурные токи:  $I_{K1} = -30$  мА,  $I_{K2} = 40$  мА.

Искомые токи будут равны:

$$I_1 = I + I_{K1} = 20 \text{ мА}, I_2 = -I_{K1} = 30 \text{ мА}, I_3 = I - I_{K2} = 10 \text{ мА},$$

$$I_4 = I_{K2} = 40 \text{ мА}, I_5 = I_{K1} + I_{K2} = 10 \text{ мА}.$$

Составляем баланс мощностей:

$$P_{\text{и}} = -E_2 I_2 + (R_1 I_1 + R_3 I_3) I = 11,2 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{п}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 = 11,2 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{и}} = P_{\text{п}} = 11,2 \text{ Вт}.$$



Определим ток в ветви  $ab$  методом эквивалентного генератора.

Решение задачи распадается на два этапа.

1. Определим напряжение холостого хода  $U_{xx}$  на зажимах разомкнутой ветви  $ab$ .

Источник тока преобразуем в эквивалентный источник ЭДС с  $E_1 = (R_1 + R_3)I = 50(5+16) = 1050$  В. Схема для этого случая показана на рис. 1.18 а.

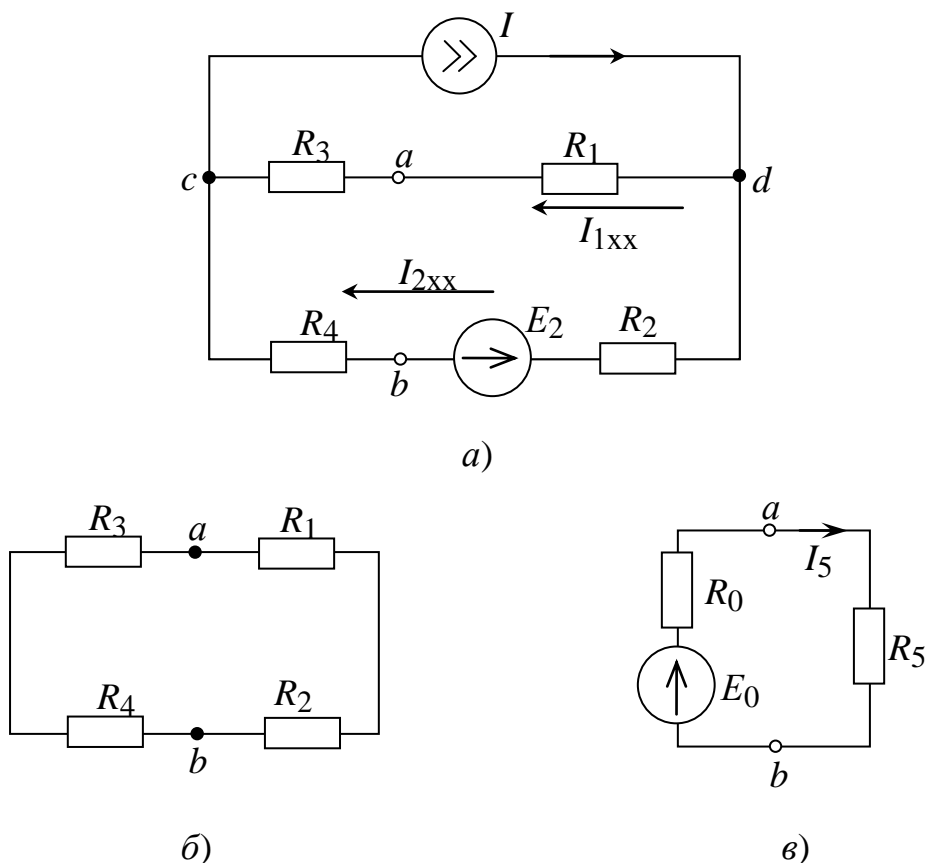


Рис. 1.18

По закону Ома определим ток  $I_{2xx}$

$$I_{2xx} = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{1050 - 60}{5 + 4 + 16 + 2} = 36,67 \text{ мА}$$

Обратимся к закону Ома и рассчитаем напряжение  $U_{dc}$

$$U_{dc} = E_2 + (R_2 + R_4) I_{2xx} = 60 + (4 + 2) 36,67 = 280 \text{ В.}$$

Для нахождения  $U_{xx}$  следует найти ток  $I_{1xx}$

$$I_{1xx} = \frac{U_{dc}}{R_1 + R_3} = \frac{280}{5 + 16} = 13,33 \text{ мА.}$$

$$U_{xx} = E_0 = I_{1xx} R_3 - I_{2xx} R_4 = 13,33 \cdot 16 - 36,67 \cdot 2 = 140 \text{ В}$$

2. Определим эквивалентное сопротивление  $R_0$ . Для этого необходимо замкнуть источник ЭДС, а источник тока отбросить. Схема для этого случая показана на рис. 1.18 б).

$$R_0 = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{9 \cdot 18}{27} = 6 \text{ кОм.}$$

Ток  $I_5$  определяем по закону Ома для замкнутого контура (см. рис. 1.18 в)

$$I_5 = \frac{E_0}{R_0 + R_5} = \frac{140}{6 + 8} = 10 \text{ мА.}$$

**Задача 4.** Определить токи и составить баланс мощностей для схемы на рис. 1.19, рассчитать ток в ветви  $ab$  методом эквивалентного генератора и напряжение между точками  $a$  и  $b$  для исходной схемы. Дано:  $E_1 = 42 \text{ В}$ ,  $E_2 = 24 \text{ В}$ ,  $R_1 = R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = R_4 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 6 \text{ Ом}$ .

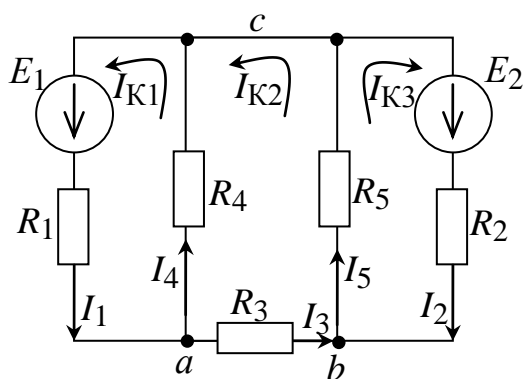


Рис. 1.19

**Решение.**

Схема содержит шесть ветвей ( $m = 5$ ) и четыре узла ( $n = 3$ ). Число уравнений составляемых по методу контурных токов, равно  $m - (n - 1) = 3$ . Зададим произвольное направление контурных токов  $I_{K1}$ ,  $I_{K2}$ ,  $I_{K3}$ , как показано на рис. 1.19. Составим систему уравнений методом контурных токов

$$\begin{aligned} (R_1 + R_4)I_{K1} - R_4 I_{K2} &= E_1, \\ -R_4 I_{K1} + (R_3 + R_4 + R_5)I_{K2} + R_5 I_{K3} &= 0, \\ R_5 I_{K2} + (R_2 + R_5)I_{K3} &= E_2 \end{aligned}$$

Подставляя численные значения и решая эти уравнения, найдем контурные токи:  $I_{K1} = 7,976 \text{ А}$ ,  $I_{K2} = 1,46 \text{ А}$ ,  $I_{K3} = 1,902 \text{ А}$ .

Искомые токи будут равны:

$$I_1 = I_{K1} = 7,976 \text{ А}, I_2 = I_{K3} = 1,902 \text{ А}, I_3 = I_{K2} = 1,46 \text{ А},$$

$$I_4 = I_{K1} - I_{K2} = 6,516 \text{ А}, I_5 = I_{K3} = I_{K2} + I_{K3} = 3,362 \text{ А}.$$

Составляем баланс мощностей:

$$P_{\text{и}} = E_1 I_1 + E_2 I_2 = 380,65 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{п}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 = 380,65 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{и}} = P_{\text{п}} = 380,65 \text{ Вт}.$$

Определим ток в ветви  $ab$  методом эквивалентного генератора.

Решение задачи распадается на два этапа.

1. Определим напряжение холостого хода  $U_{\text{хх}}$  на зажимах разомкнутой ветви  $ab$ . Схема для этого случая показана на рис. 1.20  $a$ .

Рассчитаем токи для цепи на рис. 1,20  $a$

$$I_{1\text{хх}} = \frac{E_1}{R_1 + R_4} = 7 \text{ А},$$

$$I_{2\text{хх}} = \frac{E_2}{R_2 + R_5} = 3 \text{ А}.$$

Примем потенциал точки  $b$  равным нулю, тогда напряжение между точками  $a$  и  $b$  равно потенциалу точки  $a$  и равно  $U_{\text{хх}}$ .

$$U_{\text{хх}} = E_0 = I_{1\text{хх}} R_4 - I_{2\text{хх}} R_5 = 10 \text{ В}.$$

2. Определим эквивалентное сопротивление  $R_0$ . Для этого необходимо закортить все источники ЭДС. Схема для этого случая показана на рис. 1.20  $б$ .

$$R_0 = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} + \frac{R_2 \cdot R_5}{R_2 + R_5}$$

Ток  $I_3$  определяем по закону Ома для замкнутого контура (см. рис. 1.20  $в$ )

$$I_3 = \frac{E_0}{R_0 + R_3} = \frac{10}{2,83 + 4} = 1,46 \text{ А}.$$

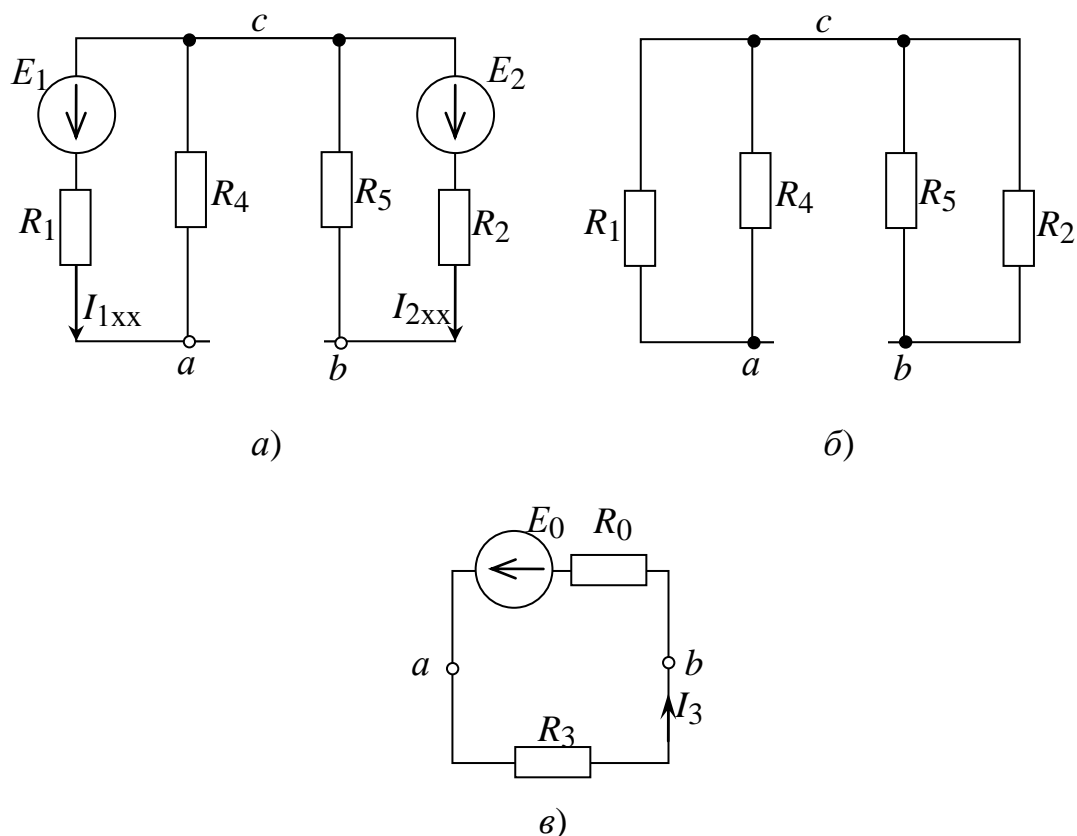


Рис. 1.20

### Вопросы для самопроверки

1. В чем различие электрической цепи и её схемы замещения?
2. Как перейти от схемы с источником ЭДС к эквивалентной схеме с источником тока?
3. Сформулируйте обобщенный закон Ома и запишите его для участка цепи, содержащего источник ЭДС.
4. Какое количество уравнений составляют по первому и второму законам Кирхгофа для определения токов в ветвях электрической цепи?
5. Приведите примеры последовательного и параллельного соединения элементов в электрических устройствах.
6. Можно ли по одному заданному току и известным сопротивлениям ветвей определить ЭДС единственного источника электрической энергии в цепях с различным соединением элементов?
7. В чем преимущество метода контурных токов по сравнению с другими методами расчета электрических цепей?
8. Когда целесообразно применять метод суперпозиции (наложения) для расчета электрических цепей?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Л.А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 11-е изд. Гардарики, 2006. § 1.1, 1.29.

2. К.С. Демирчян. Теоретические основы электротехники. В 3-х томах. 4-е изд. Питер, 2006. § 1.1, 1.2, 1.3.

## 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

### Общие сведения

Синусоидальным (переменным) называется ток, изменяющийся по закону  $i = I_m \sin(\omega t + \alpha)$ .

Он характеризуется мгновенным значением  $i$ , А, амплитудным значением  $I_m$ , А, угловой частотой  $\omega$ , с<sup>-1</sup>, начальной фазой  $\alpha$ , периодом  $T$ , с, и циклической частотой  $f$ , Гц. Справедливы соотношения

$$f = \frac{1}{T}, \quad \omega = 2\pi f.$$

На рис. 2.1 представлен график переменного тока.

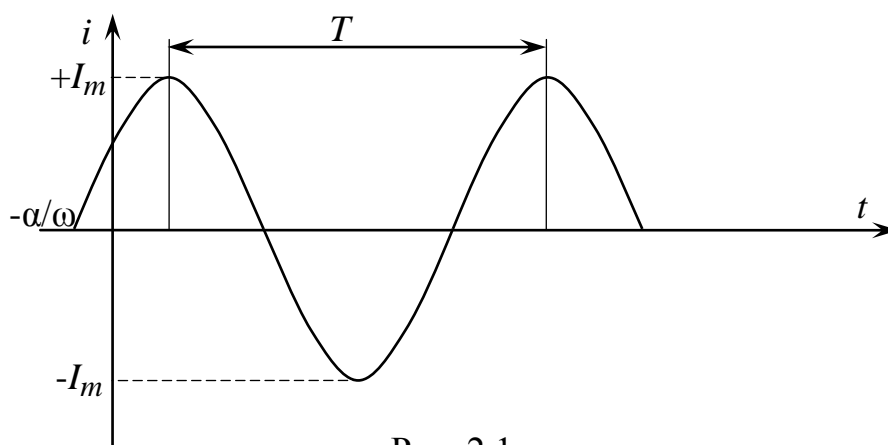


Рис. 2.1

Переменные напряжения и ЭДС изменяются по законам

$$u = U_m \sin(\omega t + \beta), \quad e = E_m \sin(\omega t + \gamma).$$

Переменная ЭДС может быть получена с помощью рамки, вращающейся в однородном магнитном поле (рис. 2.2). Пронизывающий рамку магнитный поток  $\Phi = 2RIB \cos \alpha$ .

При вращении рамки с постоянной скоростью  $\omega$  имеем  $\alpha = \omega t$  и по закону электромагнитной индукции  $e = -\frac{d\Phi}{dt} = E_m \sin \omega t$ ,  $E_m = 2RIB\omega$ .

Действующее значение переменного тока  $I$  равно значению постоянного тока, эквивалентного по средней мощности, выделяемой в резисторе:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} ; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} ; E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} .$$

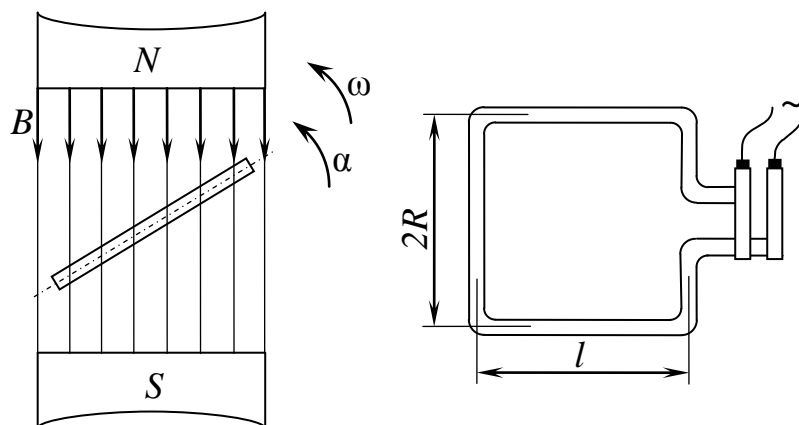


Рис. 2.2

Переменные токи, напряжения и ЭДС можно представить вращающимися векторами и комплексными числами. Комплексные амплитуды и действующие значения определяются следующими значениями

$$\underline{I}_m = I_m e^{j\alpha}, \quad \underline{U}_m = U_m e^{j\beta}, \quad \underline{E}_m = E_m e^{j\gamma};$$

$$\underline{I} = I e^{j\alpha}, \quad \underline{U} = U e^{j\beta}, \quad \underline{E} = E e^{j\gamma} .$$

Векторной диаграммой называется изображение комплексных значений на комплексной плоскости векторами.

Приведем примеры представления синусоидальных токов и напряжений комплексными числами.

Пример 1: комплексному действующему значению напряжения

$$\underline{U} = -100 - j100\sqrt{3} \text{ соответствует мгновенное значение напряжения } u = \sqrt{2} 200 \sin(314t - 120^\circ) /$$

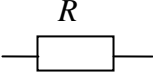


Комплексное сопротивление  $\underline{Z}$  и комплексная проводимость  $\underline{Y}$  определяются равенствами (закон Ома):

$$\frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \underline{Z} = z e^{j\varphi} = r + jx, \text{ Ом}; \quad \frac{\underline{I}}{\underline{U}} = \underline{Y} = y e^{-j\varphi} = g - jb, \text{ Ом}^{-1} .$$

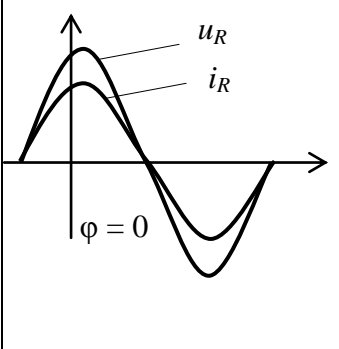
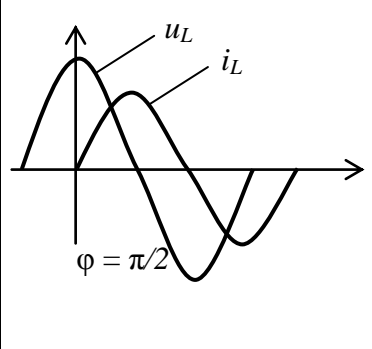
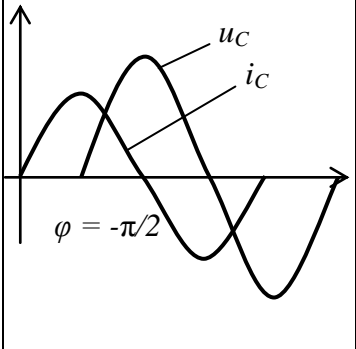
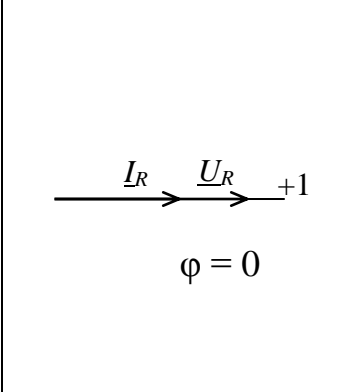
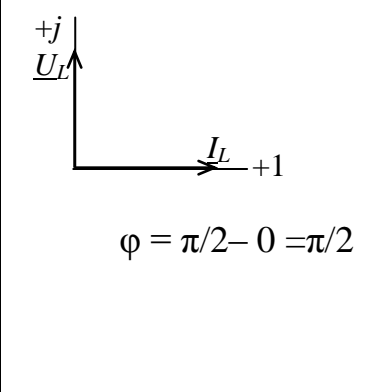
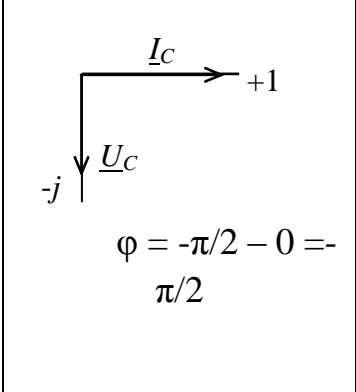
Здесь  $z, y$  – полное сопротивление и проводимость;  $r, g$  – активные составляющие;  $x, b$  – реактивные составляющие.

Для активного сопротивления, катушки индуктивности и конденсатора формулы, графики и векторные диаграммы приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметры	Активное сопротивление	Индуктивность	Емкость
Обозначение на схемах и написание в формулах			
Модули активного, индуктивного и емкостного сопротивлений	$R$	$x_L = \omega L$	$x_C = \frac{1}{\omega C}$
Комплексы сопротивлений	$\underline{Z}_R = R$	$\underline{Z}_L = j x_L$	$\underline{Z}_C = -j x_C$
Модули активной, индуктивной и емкостной проводимостей	$g = \frac{1}{R}$	$b_L = \frac{1}{\omega L}$	$b_C = \omega C$
Комплексы проводимостей	$\underline{Y}_R = g$	$\underline{Y}_L = -j b_L$	$\underline{Y}_C = j b_C$

Продолжение табл. 2.1

Волновые диаграммы напряжений и токов			
Векторные диаграммы напряжений и токов			

I закон Кирхгофа в комплексной форме: алгебраическая сумма комплексных токов ветвей, сходящихся в узле, равна нулю.

II закон Кирхгофа в комплексной форме: алгебраическая сумма комплексных падений напряжений на пассивных элементах контура равна алгебраической сумме комплексных ЭДС, действующих в контуре.

$$\sum_k I_k = 0; \quad \sum_k E_k = \sum_s U_s.$$

Если  $u = U_m \sin(\omega t + \alpha + \varphi)$ ,  $i = I_m \sin(\omega t + \alpha)$ , то  $P = UI \cos\varphi$ ,  $Q = UI \sin\varphi$ ,  $S = UI$ , где  $P$  – активная мощность, Вт (средняя за период);  $Q$  – реактивная мощность, вар;  $S$  – полная мощность, ВА. Эти величины могут быть определены по формуле:

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{U} \underline{I}^*,$$

где  $\underline{I}^*$  – комплексносопряженное току  $\underline{I}$  число. Для пассивного элемента и источника ЭДС имеем

$$S_Z = Z I^2, \quad S_E = \underline{E} \underline{I}^*.$$

Баланс мощностей – это равенство активных и реактивных мощностей, развиваемых источниками и потребляемых пассивными элементами.

При последовательном соединении  $r$ ,  $L$  и  $C$  (рис. 2.3 а)

$$\underline{Z} = r + j(x_L - x_C) = r + jx = ze^{j\varphi}.$$



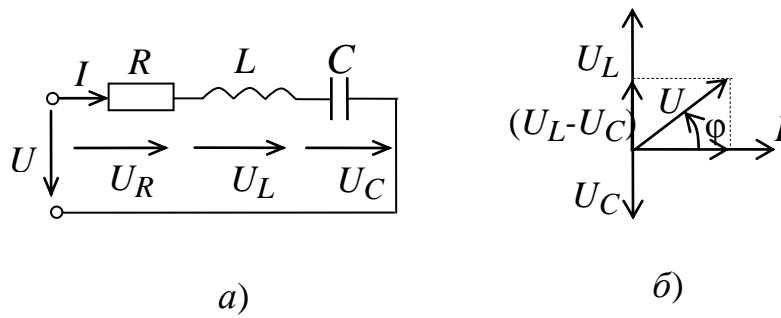


Рис. 2.3

Если  $\omega L = 1/\omega C$ , то в цепи наблюдается резонанс напряжений. При этом  $x = 0$ ,  $\varphi = 0$ , и ток максимален при  $U = \text{const}$ . Реактивные сопротивления  $x_L$  и  $x_C$  равны волновому сопротивлению  $\rho$ :

$$x_L = x_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho; \quad \frac{U_C}{U} = \frac{U_L}{U} = \frac{\rho}{R} = Q,$$

где  $Q$  – добротность контура.

При параллельном соединении элементов  $g, L, C$  (рис. 2.4 а)

$$\underline{Y} = ye^{-j\varphi} = g - j(b_L - b_C) = g - jb.$$

Если  $\omega C = 1/\omega L$ , то в цепи наблюдается резонанс токов. При этом  $b = 0$ ,  $\varphi = 0$ , а напряжение максимально при  $I = \text{const}$ . Реактивные сопротивления  $b_L$  и  $b_C$  равны волновой проводимости  $\gamma$ :

$$b_L = b_C = \sqrt{\frac{C}{L}} = \gamma,$$

$$\frac{I_C}{I} = \frac{I_L}{I} = \frac{\gamma}{R} = Q.$$

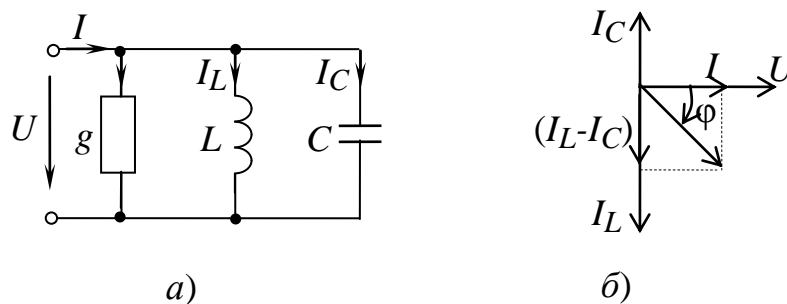


Рис. 2.4

Взаимной индукцией называется явление наведения ЭДС в одной катушке при изменении тока в другой катушке. Если эти катушки имеют числа витков  $W_1, W_2$  активные сопротивления  $r_1, r_2$  индуктивности  $L_1, L_2$  и взаимную индукцию  $M$ , то

$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \quad u_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

или в комплексной форме

$$\underline{U}_1 = r_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2, \quad \underline{U}_2 = r_2 I_2 + j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1.$$

Здесь  $\psi_{12} = W_1 \Phi_{12} = M i_2$ ,  $\psi_{21} = W_2 \Phi_{21} = M i_1$  – потокосцепления взаимной индукции.

На рис. 2.5а показаны катушки с взаимной индуктивностью, а на рис. 2.5 б – векторная диаграмма. Звездочками отмечены одноименные зажимы, при одинаковой ориентации токов  $i_1, i_2$ , относительно которых потоки самоиндукции и взаимной индукции совпадают по направлению.

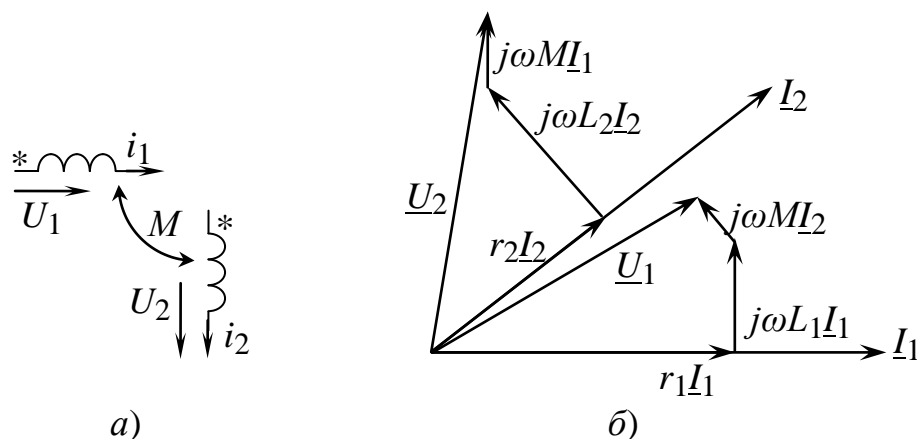


Рис.2.5

## Методические указания к изучению раздела 2.

При изучении явлений резонанса в цепях переменного тока необходимо знать условия их возникновения, а также обратить внимание на практическое применение резонанса токов для искусственного повышения коэффициента мощности в промышленных электроустановках. В то же время возникновение резонанса напряжений в электрических устройствах может представлять опасность, как для самих устройств, так и для обслуживающего персонала.

Изучая явление резонанса, необходимо усвоить, следующее. При резонансе напряжение и ток на зажимах цепи, всегда совпадают по фазе.

Настройка же цепи на резонанс зависит от схемы соединений индуктивности и емкости. Для последовательной цепи условием резонанса является равенство индуктивного и емкостного сопротивлений  $x_L = x_C$ . Для цепи, содержащей параллельный контур, в одной из ветвей которого находится индуктивность, а в другой – емкость, условием резонанса является равенство реактивных проводимостей ветвей:  $b_L = b_C$ .

При расчете цепей синусоидального тока приходится совершать различные математические операции, которые удобно производить над действующими значениями токов и напряжений, рассматривая их как векторы. Величины векторов при этом равны действующим значениям тока напряжения, а начальная фаза определяет положение вектора, относительно положительной горизонтальной оси координат. При положительной (опережающей) начальной фазе вектор повернут на соответствующий угол против движения часовой стрелки, а при отрицательной (отстающей) – по направлению движения часовой стрелки. Совокупность векторов, изображающих синусоидальные ЭДС, напряжения и токи одной частоты, выходящих из общей точки, называют векторной диаграммой.

Для цепей синусоидального тока обычно строят потенциальную топографическую диаграмму, каждая точка которой соответствует определенной точке электрической цепи. Чтобы осуществить это соответствие точек диаграммы и цепи, построение потенциальной диаграммы ведут в той же последовательности, в какой обходят электрическую цепь. Обычно направление обхода выбирают противоположным принятому направлению тока в цепи. Для наглядности в некоторых случаях векторные и потенциальные диаграммы объединяют в одну. Необходимо обратить особое внимание на направление векторов на потенциальных диаграммах. Векторы напряжений направлены относительно точек потенциальной диаграммы противоположно положительным направлениям напряжений относительно соответствующих точек цепи.

Ценность потенциальной диаграммы состоит в том, что она позволяет определить напряжение между любыми точками цепи. Для этого следует соединить соответствующие точки потенциальной диаграммы отрезком прямой и придать этому отрезку соответствующее направление.

При помощи потенциальной диаграммы удобно производить сложение напряжений, возникающих на отдельных участках последовательной цепи (второй закон Кирхгофа).

При построении векторных диаграмм один из векторов принимают как основной, располагая его обычно по положительному направлению горизонтальной оси. В этом случае начальная фаза тока или напряжения в за-

висимости оттого, что данный вектор изображает, равна нулю. В последовательной цепи за основным вектор принимают вектор тока, а в параллельной – вектор напряжения.

Для практических расчетов удобнее выражать векторы тока и напряжения, а также сопротивления и проводимости комплексными числами, в которых активные составляющие являются действительными величинами, а реактивные – мнимыми. Причем знак у мнимой величины зависит от реактивной составляющей. При расчете цепей переменного тока с помощью комплексных чисел могут быть использованы методы расчета, применяемые для цепей постоянного тока. Уравнения Кирхгофа в этом случае записываются как составляющие геометрические суммы.

При выполнении расчетов по методу комплексных чисел следует иметь в виду, что вещественная и мнимая части комплексного сопротивления, комплексной проводимости и комплексной мощности всегда представляют собой, соответственно, активную и реактивную составляющие этих величин; что же касается комплексного напряжения и комплексного тока, что такое положение имеет место лишь в частных случаях. Вещественная и мнимая части комплексного напряжения и комплексного тока определяются начальными фазами величин, иначе говоря, зависят от расположения соответствующих векторов относительно осей комплексной плоскости, тогда как их активная и реактивная составляющие определяются углом сдвига фаз  $\varphi$  между этими двумя векторами.

Анализируя магнитосвязанные электрические цепи, необходимо иметь в виду, что при составлении уравнений по второму закону Кирхгофа с учетом напряжения от взаимной индукции сравнивается направление обхода рассматриваемой катушки и направление тока во влияющей на нее катушке. Если эти направления совпадают, то напряжение взаимной индукции учитывается со знаком «плюс», в противном случае – со знаком «минус».

### Пример решения задачи

#### Задача 1.

Дано (рис. 2.6):  $e = 120\sqrt{2} \sin \omega t$ ,  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 24 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 15 \text{ Ом}$ ,  $L_1 = 19,1 \text{ мГн}$ ,  $L_3 = 63,5 \text{ мГн}$ ,  $C_2 = 455 \text{ мкФ}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Найти мгновенные значения токов в ветвях, составить баланс мощностей, построить векторную диаграмму токов и потенциальную диаграмму по внешней контуре цепи.

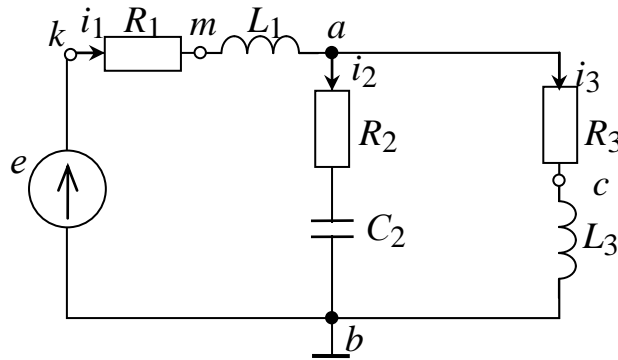


Рис. 2.6

**Решение.**

1. Вычислим модули реактивных сопротивлений:  
так как  $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314$  рад/с,  
то

$$x_{L_1} = \omega \cdot L_1 = 314 \cdot 19,1 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ Ом};$$

$$x_{L_3} = \omega \cdot L_3 = 314 \cdot 63,5 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ Ом};$$

$$x_{C_2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 455 \cdot 10^{-6}} = 7 \text{ Ом};$$

2. Представим все величины в комплексной форме.

Комплекс действующего значения входного сопротивления

$$\underline{U} = \frac{120\sqrt{2}}{\sqrt{2}} e^{j0^\circ} = 120 \text{ В.}$$

Комплексы сопротивления ветви, участка  $ab$  и всей цепи:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jx_{L_1} = 10 + j6 = 11,6 e^{j31^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jx_{C_2} = 24 - j7 = 25 e^{-j16^\circ 15'} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + jx_{L_3} = 15 + j20 = 25 e^{j53^\circ 10'} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{(24 - j7)(15 + j20)}{(24 - j7) + (15 + j20)} = \frac{25 e^{-j16^\circ} \cdot 25 e^{j53^\circ 10'}}{41 e^{j18^\circ 25'}} =$$

$$15,24 e^{j18^\circ 30'} = 14,4 + j4,84 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ab} = 10 + j6 + 14,4 + j4,84 = 24,4 + j10,84 = 26,7 e^{j23^\circ 55'} \text{ Ом.}$$

3. Вычислим комплексные значения токов в ветвях:

$$\underline{I}_1 = \frac{U}{\underline{Z}} = \frac{120}{26,7e^{j23^\circ 55'}} = 4,5e^{-j23^\circ 55'} = 4,13 - j1,82 \text{ А.}$$

Напряжение на участке  $ab$ :

$$\underline{U}_{ab} = \underline{Z}_{ab} \cdot \underline{I}_1 = 15,24e^{j18^\circ 30'} \cdot 4,5e^{-j23^\circ 55'} = 68,6e^{j5^\circ 25'} \text{ В;}$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_2} = \frac{68,6e^{-j5^\circ 25'}}{25e^{-j16^\circ 15'}} = 2,74e^{j10^\circ 50'} = 2,7 + j0,5 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{23}} = \frac{68,6e^{-j5^\circ 25'}}{25e^{j53^\circ 10'}} = 2,74e^{-j58^\circ 35'} = 1,42 - j2,34 \text{ А.}$$

4. Составим баланс мощностей

$$\underline{S}_{\text{и}} = \underline{E} \cdot \underline{I}_1^* = 120 \cdot (4,13 + j1,82) = 495,6 + j218,4 \text{ ВА,}$$

$$\underline{S}_{\text{п}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + jI_1^2 x_{L1} + jI_3^2 x_{L3} - jI_2^2 x_{C2} = 495,6 + j218,4 \text{ ВА,}$$

где  $I_1^2, I_2^2, I_3^2$  – квадраты действующих значений токов.

$$\underline{S}_{\text{и}} = \underline{S}_{\text{п}}.$$

5. Запишем мгновенные значения токов в ветвях, используя их комплексные значения:

$$i_1 = 4,5 \sqrt{2} \sin(314t - 23^\circ 55'), \text{ А;}$$

$$i_2 = 2,74 \sqrt{2} \sin(314t + 10^\circ 50'), \text{ А;}$$

$$i_3 = 2,74 \sqrt{2} \sin(314t - 58^\circ 35'), \text{ А.}$$

6. Построим векторную диаграмму токов и потенциальную диаграмму по внешнему контуру цепи, для чего вычислим комплексные потенциалы точек по внешнему контуру цепи. Для этого заземлим точку  $b$ , тогда потенциалы всех точек будут равны:

$$\varphi_b = 0;$$

$$\varphi_k = \underline{E} = 120 \text{ В;}$$

$$\varphi_m = \varphi_k - R_1 \underline{I}_1 = 120 - 10(4,13 - j1,82) = 78,7 + j18,2 \text{ В;}$$

$$\varphi_a = \varphi_m - j x_{L1} \underline{I}_1 = 78,7 + j18,2 - j6(4,13 - j1,82) = 67,78 - j6,76 \text{ В;}$$

$$\varphi_c = \varphi_a - R_3 \underline{I}_3 = 67,78 - j6,76 - 15(1,42 - j2,34) = 46,48 + j28,34 \text{ В;}$$

$$\varphi_b = \varphi_c - j x_{L3} \underline{I}_3 = 46,48 + j28,34 - j20(1,42 - j2,34) = 67,78 - j6,76 \text{ В;}$$

( $\varphi_b$  приблизительно равно нулю)

на рис. 2.7 представлена векторная диаграмма токов цепи и потенциальная диаграмма цепи по внешнему контуру.

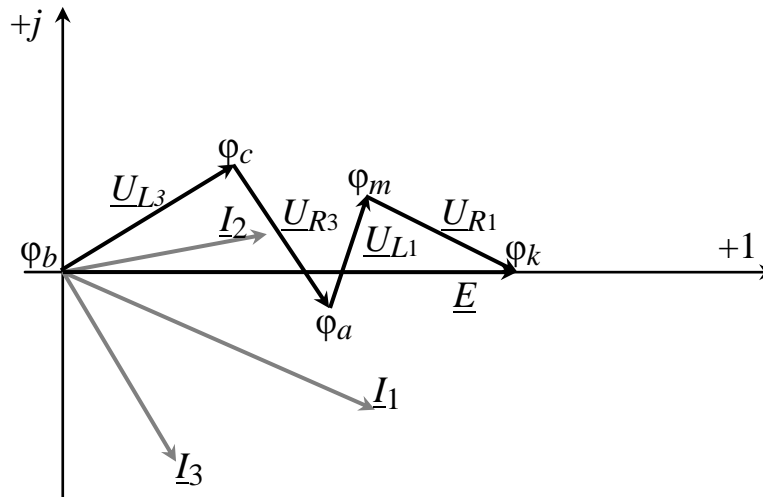


Рис. 2.7

**Задача 2.**

Дано (рис. 2.8):  $E = 50$  В,  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом,  $R_3 = 10$  Ом,  $L_1 = 19,1$  мГн,  $C_2 = 159$  мкФ,  $f = 50$  Гц.

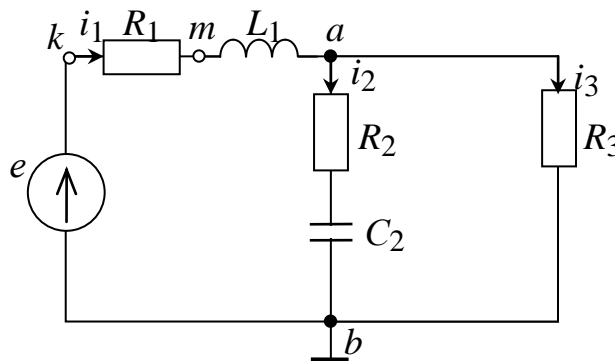


Рис. 2.8

Найти значения токов в ветвях, составить баланс мощностей, построить векторную диаграмму токов и потенциальную диаграмму по внешнему контуру цепи.

**Решение.**

1. Вычислим модули реактивных сопротивлений:

так как  $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314$  рад/с,

то

$$x_{L1} = \omega \cdot L_1 = 314 \cdot 19,1 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ Ом};$$

$$x_{C_2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314 \cdot 159 \cdot 10^{-6}} = 20 \text{ Ом};$$

2. Представим все величины в комплексной форме.

Комплекс действующего значения входного сопротивления

$$\underline{U} = 50 \text{ В.}$$

Комплексы сопротивления ветви, участка  $ab$  и всей цепи:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jx_{L_1} = 10 + j6 = 11,6 e^{j31^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jx_{C_2} = 4 - j20 = 20,4 e^{-j78^\circ 42'} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 = 10 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{(4 - j20)10}{(24 - j7) + 10} = \frac{204 e^{-j78^\circ 42'}}{24 e^{-j55^\circ}} = 8,4 e^{-j23^\circ 39'} = 7,7 - j3,4 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ab} = 10 + j6 + 7,7 - j3,4 = 17,7 + j2,6 = 17,8 e^{j8^\circ 30'} \text{ Ом.}$$

3. Вычислим комплексные значения токов в ветвях:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{50}{17,8 e^{j8^\circ 30'}} = 2,8 e^{-j8^\circ 30'} = 2,8 - j0,4 \text{ А.}$$

Напряжение на участке  $ab$ :

$$\underline{U}_{ab} = \underline{Z}_{ab} \cdot \underline{I}_1 = 8,4 e^{-j23^\circ 39'} \cdot 2,8 e^{-j8^\circ 30'} = 23,4 e^{j31^\circ 11'} = 19,8 - j12,5 \text{ В};$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_2} = \frac{23,4 e^{-j31^\circ 11'}}{20,4 e^{-j78^\circ 42'}} = 1,15 e^{j47^\circ 28'} = 0,78 + j0,85 \text{ А};$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_3} = \frac{23,4 e^{-j31^\circ 11'}}{10} = 2,34 e^{-j31^\circ 11'} = 2 - j1,2 \text{ А.}$$

4. Составим баланс мощностей

$$\underline{S}_{\text{и}} = \underline{E} \cdot \underline{I}_1^* = 50 \cdot (2,8 + j0,4) = 140 + j20 \text{ ВА},$$

$$\underline{S}_{\text{п}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + j I_1^2 x_{L_1} - j I_2^2 x_{C_2} = 140 + j20 \text{ ВА},$$

где  $I_1^2$ ,  $I_2^2$ ,  $I_3^2$  – квадраты действующих значений токов.

$$\underline{S}_{\text{и}} = \underline{S}_{\text{п}}.$$

5. Вычислим падения напряжения на отдельных элементах:

$$\underline{U}_{R_1} = \underline{I}_1 \cdot R_1 = 28 e^{-j8^\circ 30'} = 27,69 - j4,15 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{L_1} = \underline{I}_1 \cdot jx_{L_1} = 16,81 e^{j81^\circ 28'} = 2,49 + j16,63 \text{ В};$$



$$\underline{U}_{R2} = \underline{I}_2 \cdot R_2 = 4,59 e^{-j47^\circ 28'} = 3,1 + j3,38 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{C2} = \underline{I}_2 \cdot (-jx_{C2}) = 20 e^{-j42^\circ 30'} = 16,91 - j15,5 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{R3} = \underline{I}_3 \cdot R_3 = 23,4 e^{-j31^\circ 11'} = 20,02 - j12,12 \text{ В};$$

6. Построим векторную диаграмму токов и потенциальную диаграмму по внешнему контуру цепи, для чего вычислим комплексные потенциалы точек по внешнему контуру цепи. Для этого заземлим точку  $b$ , тогда потенциалы всех точек будут равны:

$$\varphi_b = 0;$$

$$\varphi_k = \underline{E} = 50 \text{ В};$$

$$\varphi_m = \varphi_k - R_1 \underline{I}_1 = 50 - 10(2,8 - j0,4) = 22,31 + j4,15 = 22,69 e^{j10^\circ 20'} \text{ В};$$

$$\varphi_a = \varphi_m - j x_{L1} \underline{I}_1 = 22,31 + j4,15 - j6(0,78 + j0,85) = 19,82 - j12,48 = 23,42 e^{-j32^\circ 11'} \text{ В};$$

$$\varphi_b = \varphi_a - R_3 \underline{I}_3 = 19,82 - j12,48 - 10(2 - j1,2) \text{ В};$$

( $\varphi_b$  приблизительно равно нулю)

на рис. 2.9 представлена векторная диаграмма токов цепи и потенциальная диаграмма цепи по внешнему контуру.

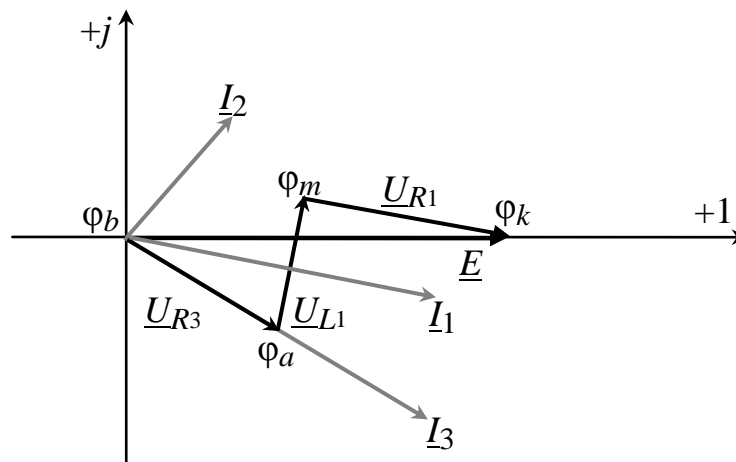


Рис. 2.9

**Задача 3.** Дано (рис. 2.10):  $E = 50 \text{ В}$ ,  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $L_1 = 15,9 \text{ мГн}$ ,  $L_2 = 1000 \text{ мГн}$ ,  $L_3 = 115 \text{ мГн}$ ,  $C_3 = 100 \text{ мкФ}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Найти значения токов в ветвях, составить баланс мощностей, построить векторную диаграмму токов и потенциальную диаграмму по внешнему контуру цепи.

**Решение.**

1. Вычислим модули реактивных сопротивлений:  
так как  $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314$  рад/с, то

$$x_{L1} = \omega \cdot L_1 = 314 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} = 5 \text{ Ом};$$

$$x_{L2} = \omega \cdot L_2 = 314 \cdot 1000 \cdot 10^{-3} = 314 \text{ Ом};$$

$$x_{L3} = \omega \cdot L_3 = 314 \cdot 115 \cdot 10^{-3} = 36,1 \text{ Ом};$$

$$x_{C3} = \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 31,85 \text{ Ом};$$

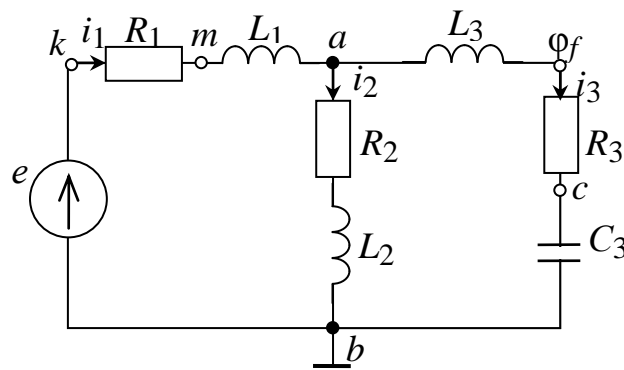


Рис. 2.10

2. Представим все величины в комплексной форме.

Комплекс действующего значения входного сопротивления

$$\underline{U} = 50e^{j0^\circ} = 50 \text{ В.}$$

Комплексны сопротивления ветви, участка  $ab$  и всей цепи:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jx_{L1} = 10 + j5 = 11,18 e^{j26^\circ 30'}$$
 Ом;

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jx_{L2} = 4 + j314 = 314,025 e^{j89^\circ 15'}$$
 Ом;

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j(x_{L3} - x_{C3}) = 100 + j4,25 = 100,09 e^{j2^\circ 25'}$$
 Ом;

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{(4 + j314)(100 + j4,25)}{(44 + j314) + (100 + j4,25)} =$$

$$93,88 e^{j20^\circ} = 88,33 + j31,8 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ab} = 10 + j5 + 88,33 + j31,8 = 98,33 + j36,8 = 104,99 e^{j20^\circ 30'}$$
 Ом.

3. Вычислим комплексные значения токов в ветвях:

$$\underline{I}_1 = \frac{U}{\underline{Z}} = \frac{50}{104,99e^{j20^\circ 30'}} = 0,476e^{-j20^\circ 30'} = 0,44 - j0,17 \text{ А.}$$

Напряжение на участке  $ab$ :

$$\underline{U}_{ab} = \underline{Z}_{ab} \cdot \underline{I}_1 = 93,88e^{j26^\circ} \cdot 0,48e^{-j20^\circ 30'} = 44,67e^{j42'} \text{ В,}$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_2} = \frac{44,67e^{-j42'}}{314,025e^{-j89^\circ 12'}} = -j0,14;$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_3} = \frac{44,67}{100,09e^{j2^\circ 25'}} = 0,45e^{-j3^\circ 9'} = 0,449 - j0,02$$

4. Составим баланс мощностей

$$\underline{S}_{\text{и}} = \underline{E} \cdot \underline{I}_1^* = 50 \cdot (0,45 + j0,17) = 22,5 + j8,5 \text{ ВА,}$$

$$\underline{S}_{\text{п}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + jI_1^2 x_{L1} + jI_2^2 x_{L2} + jI_3^2 x_{L3} - jI_3^2 x_{C3} = 22,5 + j8,5 \text{ ВА,}$$

где  $I_1^2, I_2^2, I_3^2$  – квадраты действующих значений токов.

$$\underline{S}_{\text{и}} = \underline{S}_{\text{п}}.$$

5. Построим векторную диаграмму токов и потенциальную диаграмму по внешнему контуру цепи, для чего вычислим комплексные потенциалы точек по внешнему контуру цепи. Для этого заземлим точку  $b$ , тогда потенциалы всех точек будут равны:

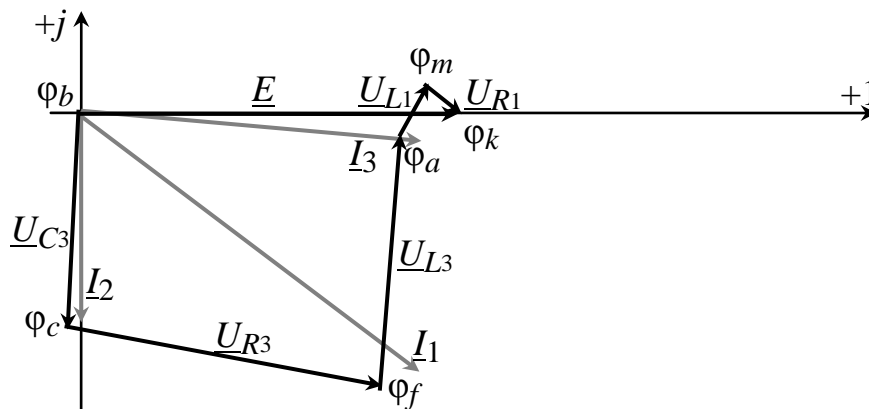


Рис. 2.11

$$\varphi_b = 0;$$

$$\varphi_k = \underline{E} = 50 \text{ В;}$$

$$\varphi_m = \varphi_k - R_1 \underline{I}_1 = 50 - 10(0,44 - j0,17) = 45,6 + j1,7 \text{ В;}$$

$$\varphi_a = \varphi_m - j x_{L1} \underline{I}_1 = 45,6 + j1,7 - j5 (0,44 - j0,17) = 44,75 - j0,5 \text{ В;}$$

$$\varphi_f = \varphi_a - j x_{L3} \underline{I}_3 = 44,75 - j0,5 - j36,1 (0,449 - j0,02) = 44,03 - j16,71 \text{ В;}$$

$$\varphi_c = \varphi_f - R_3 I_3 = 44,03 - j16,71 - 100(0,449 - j0,02) = -0,87 - j14,71 \text{ В};$$

$$\varphi_b = \varphi_c + j x_{C_3} I_3 = -0,87 - j14,71 + j31,85 (0,449 - j0,02) \text{ В};$$

( $\varphi_b$  приблизительно равно нулю)

на рис. 2.11 представлена векторная диаграмма токов цепи и потенциальная диаграмма цепи по внешнему контуру.

### Вопросы для самопроверки

1. Какими тремя величинами характеризуется синусоидально изменяющаяся величина?
2. Что понимают под действующим значением тока (напряжения)?
3. Изложить основы комплексного метода расчета.
4. На каком основании все методы расчета цепей постоянного тока применимы к цепям синусоидального тока?
5. Дать определение векторным и топографическим диаграммам.
6. Физически интерпретировать  $P$ ,  $Q$ ,  $S$ .
7. Условие резонанса напряжений и токов. Векторные диаграммы.
8. Что понимают под добротностью резонансного контура?
9. Как в расчете учитывать наличие магнитной связи между индуктивными катушками?
10. Баланс активных и реактивных мощностей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов. Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. 11-е изд. Гардарики, 2006. §3.1, 3.11, 3.16-3.18, 3.20.3.28, 3.36-3.39.
2. Демирчян. К.С. Теоретические основы электротехники. В 3-х томах. 4-е изд. Питер, 2006. §3.1, 3.16, 4.1- 4.6, 5.1 - 5.9, 6.1 - 6.5.
3. Основы теории электрических цепей: учебник для вузов / Ю.А. Бычков, В.М. Золотницкий, Э.П. Чернышев. 3-е изд., стер. СПб: Лань, 2004. §3.1, 3.16, 4.1- 4.6.

### 4 СЕМЕСТР

### КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

Работа содержит три задачи.

**Задача 1.** Для электрической цепи, изображенной на рис. 4.1, по заданным в табл. 4.1 сопротивлениям и ЭДС определить эквивалентное (входное) сопротивление цепи относительно зажимов источника питания, токи и падения напряжения во всех ветвях цепи. Составить баланс мощностей.

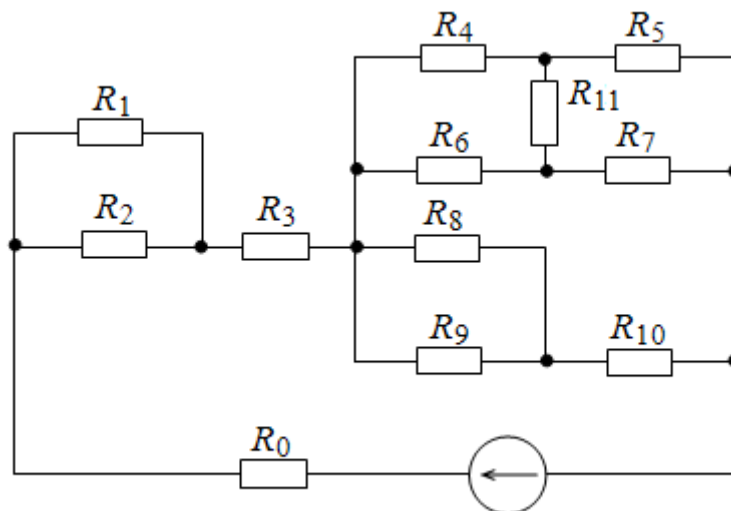


Рис. 4.1

Табл. 4.1

№ варианта	$E, В$	$R_0, Ом$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$	$R_7, Ом$	$R_8, Ом$	$R_9, Ом$	$R_{10}, Ом$	$R_{11}, Ом$
1	60	0,2	2	6	3	2	2	8	6	4	$\infty$	0,6	0
2	60	0,3	2	3	0	2	2	8	$\infty$	4	6	0,6	2
3	100	0,1	2	0	3	2	2	2	0	6	4	0,6	2
4	100	0,2	8	6	3	2	2	2	6	4	4	0,6	2
5	100	0,3	8	3	6	2	0	3	2	6	4	0,6	4
6	100	0,1	2	6	8	2	$\infty$	2	2	4	6	0,6	2
7	80	0,2	2	3	6	4	2	2	$\infty$	6	4	0,6	4
8	80	0,3	2	6	3	2	2	0	0	4	6	0,6	10
9	80	0,4	3	3	6	2	2	6	3	6	4	0,6	0
10	80	0,2	3	2	6	2	2	2	4	$\infty$	5	1,0	$\infty$
11	70	0,2	4	3	6	2	8	4	6	0,6	4,2	1,0	5
12	60	0,3	2	3	1,4	8	6	2	4	0	3	4	10
13	100	0,1	8	3	2	2	2	6	4	0,6	$\infty$	3	3
14	80	0,2	6	8	3	$\infty$	2	2	6	4	1,6	3	4
15	80	0,3	$\infty$	8	3	6	2	3	2	2	6	4	4
16	100	0,1	0	2	6	8	2	2	2	3	4	6	2
17	80	0,2	2	$\infty$	3	6	4	2	2	6	4	0,6	$\infty$
18	100	0,3	0	0	2	6	3	2	2	4	6	0,6	1,0
19	70	0,4	3	3	6	2	$\infty$	2	6	3	6	0	5
20	60	0,2	3	2	0	6	2	2	2	4	5	1,0	4

**Задача 2.** Для электрической схемы, изображенной на рис. 4.2, 4.3. по заданным в табл. 4.2 сопротивлениям и ЭДС определить токи во всех ветвях цепи, ток в ветви  $ab$  методом эквивалентного генератора и напряжение между точками  $a$  и  $b$  для исходной схемы. Составить баланс мощностей для заданной схемы.

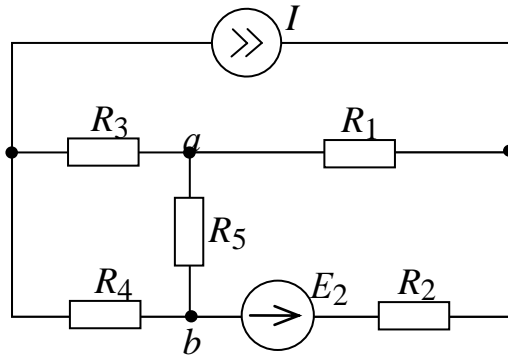


Рис.4.2

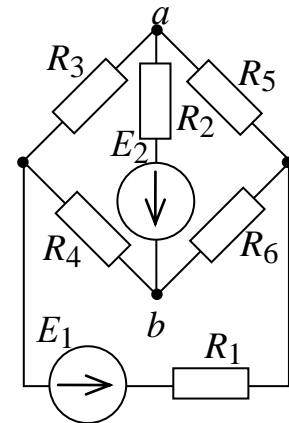


Рис.4.3

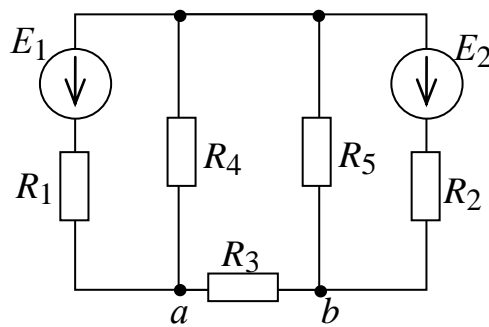


Рис.4.4

Табл. 4.2

№ варианта	Рисунок	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$I$ , А
1	4.2	1	1	1	6	6	-	-	50	40
2	4.3	2	2	4	4	6	6	40	20	-
3	4.4	8	2	6	10	4	-	20	10	-
4	4.2	6	6	2	6	4	-	-	40	30
5	4.3	2	8	3	3	4	4	12	12	-
6	4.4	8	2	6	6	4	-	24	12	-
7	4.2	8	2	2	4	6	-	-	50	60
8	4.3	2	8	2	6	6	6	12	6	-

Продолжение табл. 4.2

9	4.4	1	1	4	4	10	-	22	12	-
10	4.2	2	8	4	10	10	-	-	50	40
11	4.3	2	8	4	10	10	4	24	12	-
12	4.4	2	8	4	4	10	-	22	12	-
13	4.2	2	8	2	6	4	-	-	60	30
14	4.3	8	2	2	4	4	4	24	12	-
15	4.4	8	2	6	6	4	-	24	12	-
16	4.2	2	8	3	3	4	-	-	55	60
17	4.3	6	6	2	6	6	6	30	20	-
18	4.4	8	2	6	10	6	-	20	10	-
19	4.2	2	4	2	4	6	-	-	50	40
20	4.3	1	1	1	6	6	5	15	10	-

### Методические указания по выполнению задачи 2

1. Перед тем, как составлять уравнения по законам Кирхгофа, необходимо произвольно выбрать:

а) положительные направления токов в ветвях и обозначить их на схеме;

б) направления обхода контуров для составления уравнений по второму закону Кирхгофа. С целью единообразия рекомендуется для всех контуров направления обхода выбирать одинаковыми, например, по часовой стрелке.

2. Чтобы получить линейно независимые уравнения, по первому закону Кирхгофа составляют уравнения, число которых равно числу узлов без единицы, т.е.  $q - 1$ .

3. По второму закону Кирхгофа число уравнений равно числу ветвей без источников тока ( $p - p_{um}$ ), за вычетом уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа, т.е.  $(p - p_{um}) - (q - 1)$ .

Составляя уравнения по второму закону Кирхгофа, следует охватить все ветви схемы, исключая лишь ветви с источниками тока. При записи линейно независимых уравнений по второму закону Кирхгофа необходимо стремиться, чтобы в каждый новый контур, для которого составляют уравнения, входила хотя бы одна новая ветвь, не вошедшая в предыдущие контуры.

4. При составлении уравнений по методу контурных токов рекомендуется для единообразия в знаках слагаемых в смежных ветвях все контурные токи направлять в одну и ту же сторону, например, все по часовой стрелке.

5. При составлении энергетического баланса в электрической цепи необходимо помнить, что если направление тока встречное направлению ЭДС  $E$ , то произведение  $EI$  войдет в уравнение энергетического баланса с отрицательным знаком.

6. При составлении уравнений по методу узловых потенциалов рекомендуется заземлять тот узел, в который входит наибольшее количество ветвей электрической схемы.

7. Если при решении уравнений получаем ток с отрицательным значением, то при дальнейших расчетах (например, при составлении баланса мощности) нельзя менять знак тока на обратный.

**Задача 3.** Для электрической схемы, изображенной на рис. 4.4, 4.5, по заданным к табл. 4.3 параметрам и ЭДС источника определить, токи во всех ветвях цепи и напряжения на отдельных участках. Составить баланс активной и реактивной мощностей. Построить векторную диаграмму токов и потенциальную диаграмму напряжений по внешнему контуру.

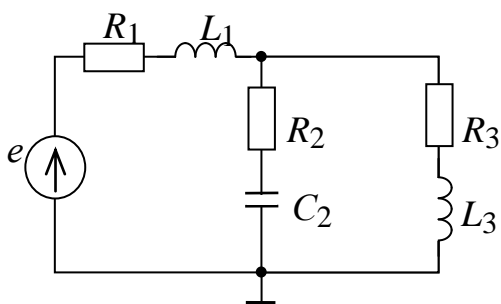


Рис. 4.7

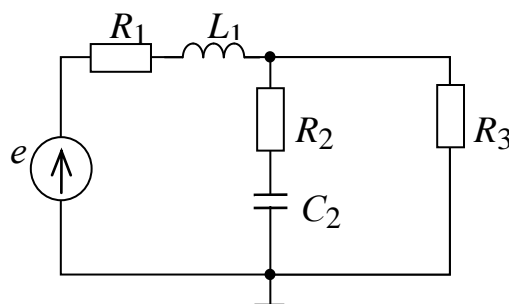


Рис. 4.6

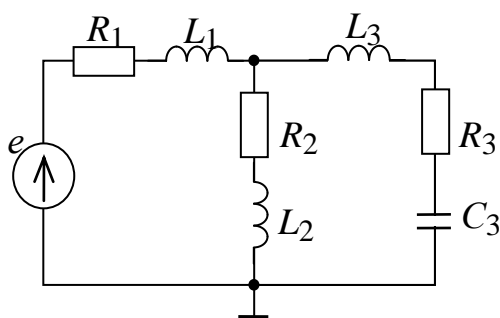


Рис. 4.5

Рекомендуется нумеровать токи ветвей согласно номерам элементов, образующих эти ветви, а направления токов выбирать вправо и вниз.



Табл. 4.3

варианта	Рисунок	$E$ , В	$f$ , Гц	$C_2$ , мкФ	$C_3$ , мкФ	$L_1$ , мГн	$L_2$ , мГн	$L_3$ , мГн	$R_1$ , Ом	$R_2$ , м	$R_3$ , м
1	4.5	50	50	-	100	15,9	100	115	10	4	10
2	4.6	50	50	318	-	9,55	-	-	4	10	40
3	4.7	150	50	1000	-	3,18	-	95	10	20	10
4	4.5	50	50	-	318	9,55	31,8	15,9	4	10	40
5	4.6	50	50	159	-	19,1	-	-	10	4	100
6	4.7	50	50	637	-	19,1	-	31,8	40	10	40
7	4.5	50	50	-	637	3,18	95	31,8	10	4	10
8	4.6	50	50	100	-	15,9	-	-	4	10	40
9	4.7	150	50	159	-	6,37	-	9,55	6	4	10
10	4.5	100	50	-	159	9,55	95	15,9	2	10	10
11	4.6	50	50	318	-	6,37	-	-	4	4	100
12	4.7	50	50	1000	-	3,18	-	115	2	10	40
13	4.5	150	50	-	100	15,9	95	100	10	4	10
14	4.6	100	50	300	-	15,9	-	-	10	4	100
15	4.7	50	50	455	-	19,1	-	63,5	10	20	10
16	4.5	50	50	-	455	15,9	95	15,9	10	40	40
17	4.6	50	50	318	-	6,37	-	-	2	10	100
18	4.7	120	50	318	-	15,9	-	95	10	25	15
19	4.5	100	50	-	100	19,1	100	115	4	10	10
20	4.6	50	50	159	-	15,9	-	-	4	10	40

### Методические указания по выполнению задачи 3.

1. При составлении уравнения в электрической цепи синусоидального тока необходимо вместо постоянного тока  $I$  подставлять комплекс тока  $\underline{I}$  вместо сопротивления  $R$  – комплексное сопротивление  $\underline{Z}$ , вместо проводимости  $G$  – комплексную проводимость  $\underline{Y}$ , вместо постоянной ЭДС  $E$  – комплексную ЭДС  $\underline{E}$ .

2. При построении топографической диаграммы потенциал любой точки схемы может быть принят равным нулю. На диаграмме эту точку необходимо поместить в начало координат. Тогда положение остальных точек схемы на диаграмме будет определяться параметрами цепи, ЭДС и токами.

3. Если на электрической схеме положительное направление напряжения показано от точки  $a$  к точке  $b$ , то на топографической диаграмме направление вектора этого напряжения будет от точки  $b$  к точке  $a$ .

### Методические указания к оформлению контрольной работы

К представленным на рецензию контрольным заданиям предъявляются следующие требования:

1) на обложке тетради следует указывать фамилию, имя и отчество, домашний адрес, номер контрольного задания, название дисциплины и вариант студента;

2) в тетради следует оставлять поля шириной не менее 4 см для замечаний рецензента;

3) начиная решение задачи, указывать, какие физические законы, расчетные методы предполагается использовать при решении, привести математическую запись этих законов и методов; причем все основные положения, приводимые при решении, должны быть пояснены;

4) промежуточные и конечные результаты расчетов должны быть четко выделены из общего текста;

5) решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований и арифметических расчетов;

6) вычисления должны быть сделаны с точностью до третьей значащей цифры;

7) рисунки, графики, схемы должны быть выполнены аккуратно и в удобочитаемом масштабе. Рекомендуется при построении кривых выбирать такой масштаб, чтобы на 1 см оси координат приходилось  $1 \cdot 10^n$  или  $2 \cdot 10^n$  единиц измерения физической величины. Градуировку осей выполнять, начиная с нуля, равномерно, через один или два сантиметра. Числовые значения координат точек, по которым строятся кривые, не приводить. Весь график в целом и отдельные кривые на нем должны иметь названия;

8) выполненные контрольные задания должны быть датированы и подписаны студентом;

9) незачтенное контрольное задание должно быть выполнено и прислано на повторную рецензию вместе с первоначальной работой и замечаниями рецензента. Исправление ошибок в отрецензированном тексте не допускается. Если неправильно выполнена не вся работа, только часть ее, то переработанный и исправленный текст следует записать, в тетради после первоначального текста подзаголовком "Исправление ошибок".

Контрольные задания зачитываются, если решения не содержат ошибок принципиального характера и выполнены все перечисленные требования.

Номер варианта контрольных задач выбирается по порядковому номеру студента в учебной группе.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Раздел 1. Электрические цепи постоянного тока . . . . .	3
Раздел 2. Электрические цепи однофазного синусоидального тока . . .	19
Контрольная работа №1. . . . .	34