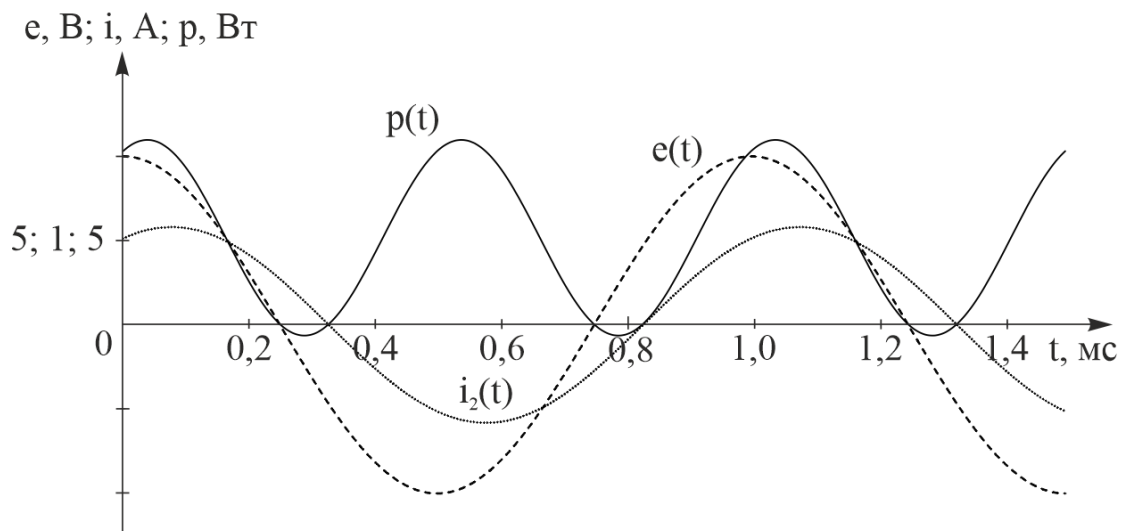


С.А. КРУГЛОВ, А.А. ДЯГИЛЕВ, А.А. СЕРЕЖИН, М.Н. МАХМУДОВ,
К.Д. АГАЛЬЦОВ, Д.С. КУСАКИН

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Учебное пособие



УДК 621.384.82

Теоретические основы электротехники: учеб. пособие/ С.А. Круглов, А.А. Дягилев, А.А. Сережин, М.Н. Махмудов, К.Д. Агальцов, Д.С. Кусакин. Рязанский гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2021. 64 с.

Содержит сведения по анализу и расчету электрических цепей постоянного и переменного тока, нелинейных цепей, резонансных контуров, трехфазных цепей, по исследованию переходных процессов. Приводятся краткие теоретические сведения, примеры расчетов заданий, задания к выполнению курсовых работ (проектов) и расчетно-графических работ.

Предназначено для студентов направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», изучающих дисциплину «Электротехника и электроника», направлений 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» и 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», изучающих дисциплину «Теоретические основы электротехники», направления 18.03.01 «Химическая технология», изучающих дисциплину «Электротехника».

Табл. 2. Ил. 61. Библиогр.: 8 назв.

Постоянный ток, переменный ток, закон Ома, законы Кирхгофа, метод контурных токов, метод эквивалентного генератора, переходный процесс, законы коммутации, трехфазная цепь, спектральная функция

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра промышленной электроники РГРТУ (проф. кафедры ПЭл А.А. Трубицын)

К р у г л о в Сергей Александрович
Д я г и л е в Александр Александрович
С е р е ж и н Андрей Александрович
М а х м у д о в Марат Наильевич
А г а л ь ц о в Кирилл Дмитриевич
К у с а к и н Дмитрий Сергеевич

Теоретические основы электротехники

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 25.08.21 Формат бумаги 60х84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 4,0.

Тираж 100 экз. Заказ .

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2021

1. РАСЧЕТ ОБЩЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Расчет основан на последовательном преобразовании электрической цепи из множества элементов в электрическую цепь, состоящую из одного элемента. Преобразование основано на замене последовательных и параллельных соединений, а также соединений “звездой” и “треугольником” их эквивалентами.

При последовательном соединении (рис. 1.1) через все элементы цепи течет одинаковый ток, а приложенное к цепи напряжение u_R , в соответствии со вторым законом Кирхгофа, равно алгебраической сумме падений напряжений на отдельных элементах. При этом справедливо следующее соотношение:

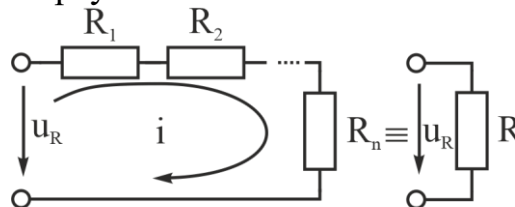


Рис. 1.1

$$u_R = R_1 i + R_2 i + \dots + R_n i = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) i = R \cdot i,$$

отсюда получаем выражение для расчета общего сопротивления R при последовательном соединении сопротивлений $R_1, R_2, \dots, R_n$:

$$R = R_1 + \dots + R_n. \quad (1.1)$$

Параллельное соединение элементов (рис. 1.2) имеет место в случае, когда ко всем элементам приложено одинаковое напряжение u_R . В этом случае по первому закону Кирхгофа можно записать:

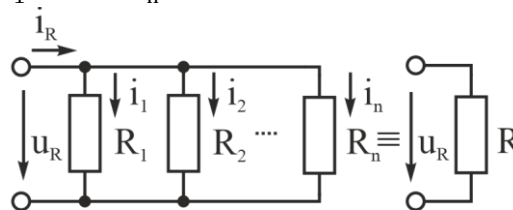


Рис. 1.2

$$i_R = i_1 + i_2 + \dots + i_n,$$

тогда для параллельного соединения имеем:

$$i_R = \frac{u_R}{R_1} + \frac{u_R}{R_2} + \dots + \frac{u_R}{R_n} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) u_R = \frac{1}{R} u_R,$$

отсюда получаем выражение для расчета общего сопротивления R при параллельном соединении сопротивлений $R_1, R_2, \dots, R_n$:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (1.2)$$

В частном случае, при параллельном соединении двух сопротивлений R_1 и R_2 , формула (1.2) преобразуется к виду:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2},$$

отсюда выражаем R :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (1.3)$$

На рис. 1.3 и 1.4 представлены соединения резисторов “звездой” и “треугольником”. Их можно тождественно преобразовать одно в другое. При этом значения тождественных элементов цепи рассчитываются по следующим формулам:

прямое преобразование – из “звезды” в “треугольник” (рис. 1.3):

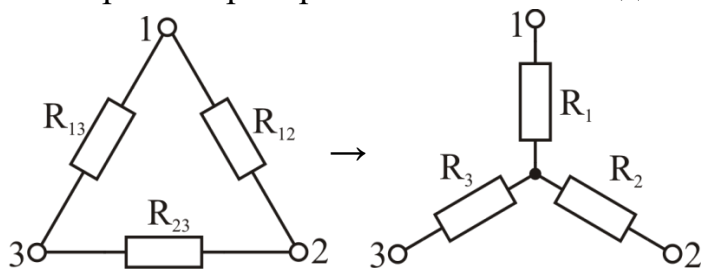


Рис. 1.3

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{13}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}},$$

$$R_2 = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}},$$

$$R_3 = \frac{R_{13} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}},$$

обратное преобразование – из “треугольника” в “звезду” (рис. 1.4):

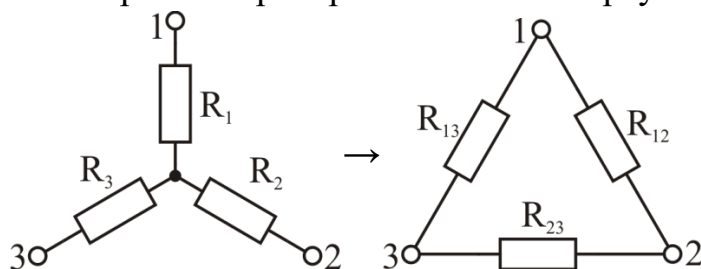


Рис. 1.4

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3},$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1},$$

$$R_{13} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 R_3}{R_2}.$$

1.1. ПРИМЕР РАСЧЕТА ОБЩЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

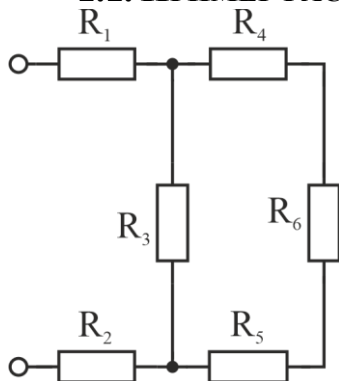


Рис. 1.5

Задание. Необходимо рассчитать общее сопротивление электрической цепи, состоящей из активных сопротивлений (рис. 1.5), изобразить схемы последовательных преобразований.

Исходные данные для расчета:

$$R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 3 \text{ Ом};$$

$$R_3 = 20 \text{ Ом};$$

$$R_4 = 24 \text{ Ом}.$$

Решение. Сопротивления R_2 , R_4 , R_5 соединены последовательно (рис. 1.6). Обозначим сопротивление этого участка цепи R_1 . Используя формулу (1.1), находим сопротивление последовательно соединенных резисторов R_2 , R_4 , R_5 :

$$R_1 = R_4 + R_5 + R_6 = 24 + 3 + 3 = 30 \text{ Ом}.$$

Резистор R_3 подключён параллельно участку цепи R_1 (рис. 1.7), обозначим сопротивление на данном участке цепи R_{II} .

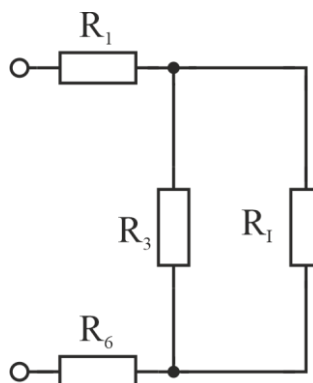


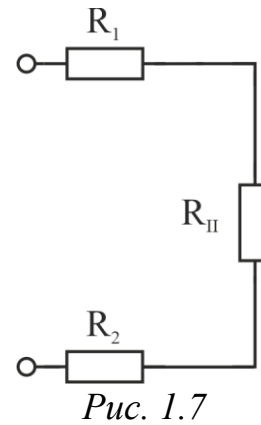
Рис. 1.6

Используя формулу (1.3), находим сопротивление двух последовательно соединенных резисторов:

$$R_{II} = \frac{R_3 R_1}{R_3 + R_1} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = 12.$$

Резисторы R_1 и R_6 соединены с участком цепи R_{II} последовательно. Используя формулу (1.1), находим сопротивление последовательного соединения резисторов:

$$R = R_1 + R_{II} + R_2 = 3 + 12 + 3 = 18 \text{ Ом}.$$



1.2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА № 1. РАСЧЕТ ОБЩЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Необходимо рассчитать общее сопротивление электрической цепи, состоящей из активных сопротивлений, изобразить эквивалентные схемы.

Исходные данные. Определить значения сопротивлений резисторов в соответствии с номером группы и номером по журналу:

- номер группы $N_{гр} = \frac{624}{abc}$, номер студента по журналу $N_{ст} = \frac{12}{km}$, следовательно, $a=6$, $b=2$, $c=4$, $k=1$, $m=2$;
- номер схемы для расчета равен номеру студента по журналу $N_{ст}$ (рис. 1.8), если номер по списку в журнале больше 15, то номер схемы для расчета равен $N_{ст} - 15$;
- сопротивление $R_1 = 10(1+k)$, [Ом];
- сопротивление $R_2 = 10(1+|c-k|)$, [Ом];
- сопротивление $R_3 = 10(1+|a-m|)$, [Ом];
- сопротивление $R_4 = 10(2+k)$, [Ом];
- сопротивление $R_5 = 10(2+|c-k|)$, [Ом];
- сопротивление $R_6 = 10(2+|a-m|)$, [Ом].

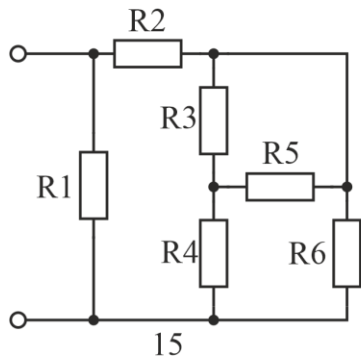
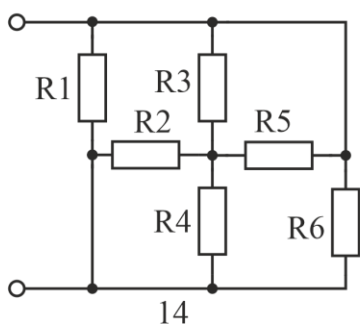
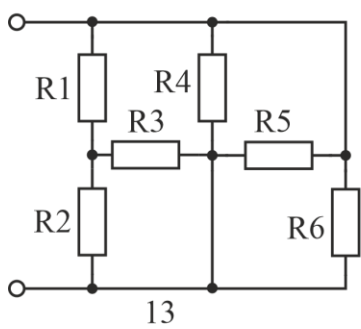
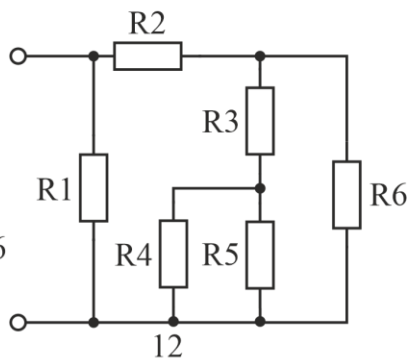
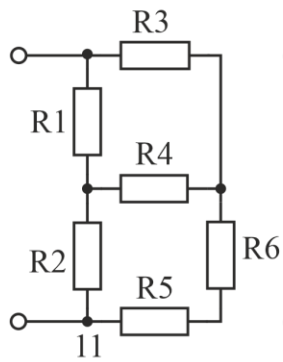
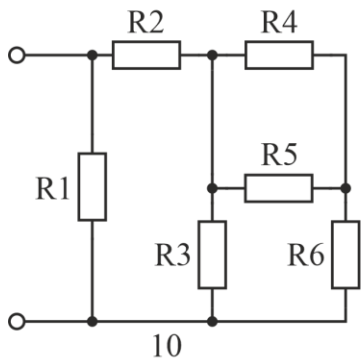
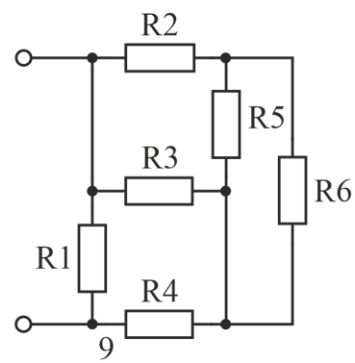
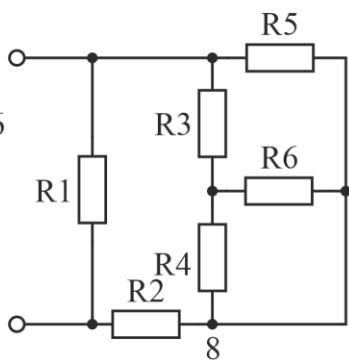
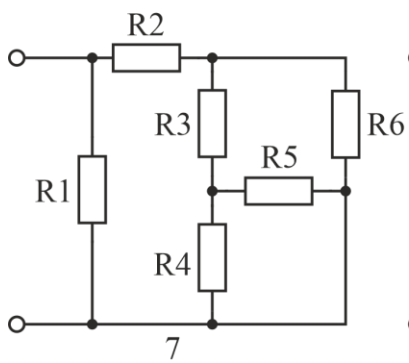
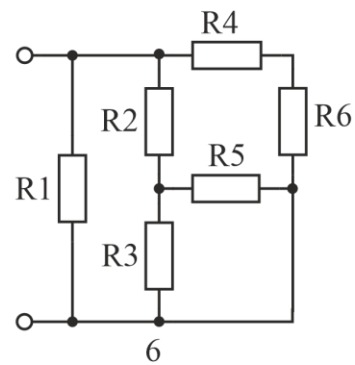
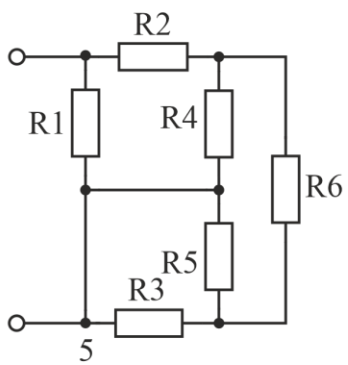
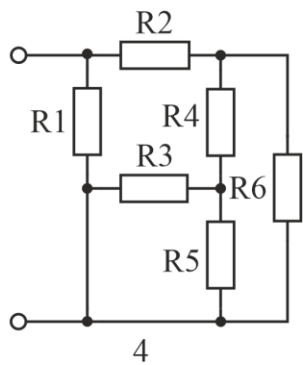
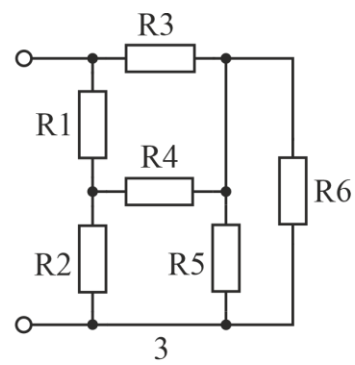
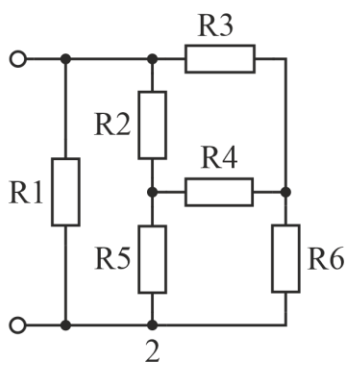
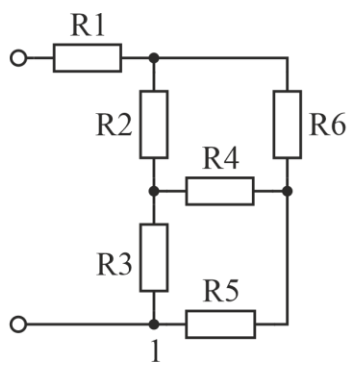


Рис. 1.8

2. РАСЧЕТ СЛОЖНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Постоянным называется электрический ток, неизменный по направлению и величине. Мгновенные значения тока и напряжения в цепи постоянного тока всегда одинаковые: $i(t) = I = \text{const}$, $u(t) = U = \text{const}$. Законы электротехники справедливы для мгновенных значений токов и напряжений, поэтому они являются общими как для цепей постоянного, так и для цепей переменного тока. Особенностью электрических цепей постоянного тока является то, что нагрузками в них могут быть только сопротивления, при этом индуктивность представляет собой проводник, емкость – разрыв.

Электрические цепи могут быть линейными и нелинейными, простыми и сложными, активными и пассивными.

Основной задачей при расчете электрической цепи является определение токов во всех ветвях, напряжения на элементах и выделяемой на них мощности. Существующие методы расчета электрических цепей отличаются различной степенью сложности.

Расчет простой электрической цепи (содержащей один источник энергии) заключается в последовательном преобразовании и нахождении токов и напряжений по закону Ома.

Для расчета сложной электрической цепи (содержащей несколько источников энергии) применяются различные методы: метод наложения, метод расчета по законам Кирхгофа, метод контурных токов, метод узловых потенциалов, метод эквивалентного генератора.

Расчет по методу наложения основан на применении принципа суперпозиции: реакция от суммы воздействий равна сумме реакций от каждого из этих воздействий. Сложная электрическая цепь разбивается на простые цепи, каждая из которых содержит по одному источнику энергии. В каждой из полученных простых цепей находятся частные токи, создаваемые отдельными источниками энергии, далее, с использованием принципа суперпозиции находятся полные токи сложной электрической цепи как сумма частных токов.

Расчет по законам Кирхгофа и методу контурных токов состоит в составлении системы линейных алгебраических уравнений по законам Кирхгофа и нахождении неизвестных токов в ветвях.

Метод эквивалентного генератора применяется, когда необходимо найти ток только в одной выделенной ветви электрической цепи. Суть метода заключается в замене исходной схемы относительно выделенной ветви активным двухполюсником с эквивалентным ЭДС и входным сопротивлением.

2.1. Расчет электрической цепи по законам Кирхгофа

Расчет любой электрической цепи можно провести на основании I и II законов Кирхгофа.

Количество уравнений, записываемое по I закону Кирхгофа, равняется числу узлов электрической цепи минус один. Таким образом, для схемы рис. 2.1 по I закону Кирхгофа получим одно уравнение для узла 1:

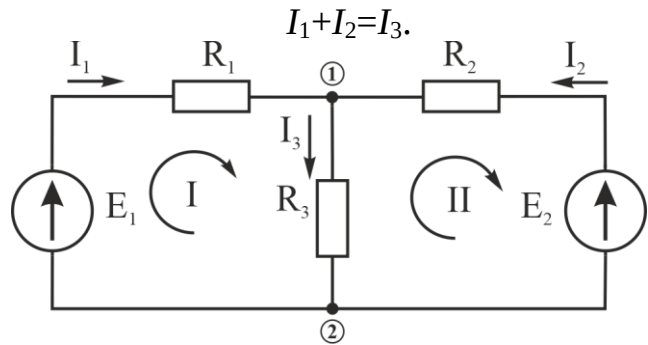
$$I_1 + I_2 = I_3. \quad (2.1)$$


Рис. 2.1

Число уравнений, записываемых по II закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров схемы и определяется как число ветвей схемы минус количество уравнений по I закону Кирхгофа. Для схемы на рис. 2.1 записываются уравнения по II закону Кирхгофа (контур I и II):

$$E_1 = R_1 I_1 + R_2 I_2, \quad (2.2)$$

$$E_2 = R_2 I_2 + R_3 I_3. \quad (2.3)$$

Таким образом, решая совместно систему из полученных уравнений (2.1), (2.2), (2.3), находим искомые токи I_1 , I_2 , I_3 в ветвях схемы на рис. 2.1.

Особенности расчета возникают, когда в схеме присутствуют источники тока. В таком случае количество уравнений по II закону Кирхгофа уменьшается на количество ветвей, содержащих источники тока (токи в ветвях с источниками тока известны). Кроме этого, по II закону Кирхгофа нельзя обходить контуры, содержащие источники тока, так как на них существует падение напряжения, которое необходимо определять дополнительно.

2.2. Расчет электрической цепи методом контурных токов

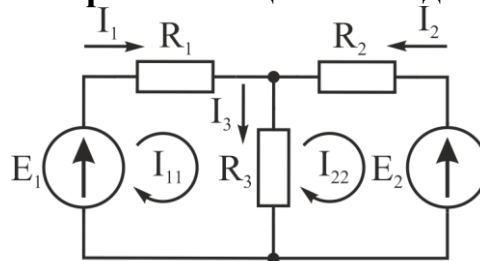


Рис. 2.2

Метод контурных токов позволяет сократить число уравнений в системе по сравнению с методом, основанным на законах Кирхгофа. При расчете по этому методу в независимых контурах вводят контурные (расчетные) токи (для схемы на рис. 2.2 контурные токи I_{11} , I_{22}). Далее составляются уравнения по II закону Кирхгофа для контурных токов (количество уравнений равняется числу независимых контуров):

$$\begin{cases} E_1 = I_{11}(R_1 + R_2) - I_{22}R_2, \\ -E_2 = I_{22}(R_2 + R_3) - I_{11}R_3. \end{cases}$$

Из решения системы двух уравнений определяем контурные токи I_{11} и I_{22} , а по ним находим реальные токи в ветвях:

$$I_1 = I_{11}, I_2 = -I_{22}, I_3 = I_{11} - I_{22}.$$

Таким образом, мы видим, что количество уравнений по сравнению с методом, основанным на законах Кирхгофа, уменьшается.

Если в схеме присутствует источник тока, то контурные токи выбираются так, чтобы через ветвь с источником тока проходил только один контурный ток. Он считается известным (равен току источника). Для остальных контурных токов составляются уравнения по II закону Кирхгофа (обходить контуры, содержащие источники тока, нельзя, так как на них существует падение напряжения, которое необходимо определять дополнительно). Следовательно, количество уравнений для расчета также уменьшается на число ветвей с источниками тока.

2.3. Расчет электрической цепи методом эквивалентного генератора

Во многих случаях требуется найти ток только в одной (выделенной) ветви электрической цепи. Такую задачу можно решить с помощью метода эквивалентного генератора. Суть метода заключается в том, что электрическая цепь относительно выделенной ветви заменяется активным двухполюсником с эквивалентным ЭДС U_{xx} и входным сопротивлением R_{bx} (рис. 2.3).

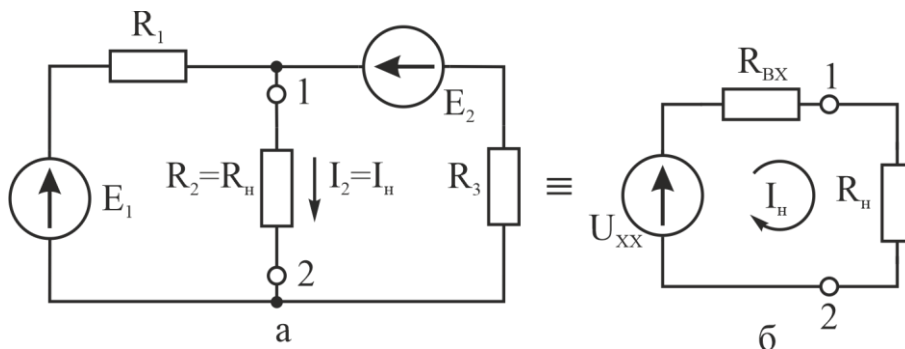


Рис. 2.3

Пусть в схеме (рис. 2.3) необходимо определить ток I_2 . Выделим ветвь 2 (зажимы 1 и 2), $I_n = I_2$, $R_n = R_2$. Ток в выделенной ветви рассчитывается по формуле

$$I_n = \frac{U_{xx}}{R_{bx} + R_2}.$$

Для определения тока I_n требуется определить параметры эквивалентного двухполюсника U_{xx} и R_{bx} . При расчете R_{bx} в исходной электрической цепи выделенная ветвь отключается, а источники энергии заменяются внутренним сопротивлением (рис. 2.4) и рассчитывается сопротивление цепи относительно зажимов 1-2:

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}.$$

При определении напряжения холостого хода $U_{\text{хх}}$ выделенная ветвь отключается (рис. 2.5) и одним из методов рассчитывается напряжение между зажимами 1-2. В рассматриваемом примере цепь для нахождения $U_{\text{хх}}$ состоит из одного контура, ток в котором равен

$$I' = \frac{E_1 - E_3}{R_1 + R_3}.$$

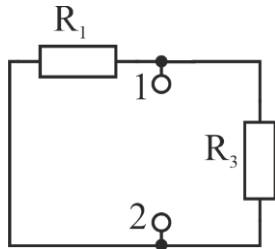


Рис. 2.4

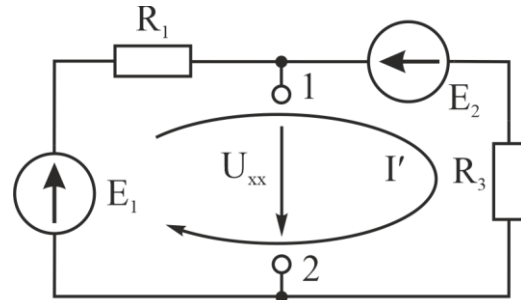


Рис. 2.5

Далее напряжение холостого хода рассчитывается по II закону Кирхгофа

$$\begin{aligned} E_3 &= U_{\text{хх}} - R_3 I', & E_1 &= U_{\text{хх}} + R_1 I', \\ U_{\text{хх}} &= E_3 + R_3 I', & U_{\text{хх}} &= E_1 - R_1 I'. \end{aligned} \quad \text{или}$$

2.4. Составление уравнения баланса мощности

Для проверки правильности расчета электрических цепей составляют уравнение баланса мощности: алгебраическая сумма мощностей, отдаваемых источниками энергии, должна быть равна сумме мощностей, выделяемых в нагрузках:

$$\sum_{i=1}^n E_i I_E + \sum_k U_J J_k = \sum_{j=1}^m R_j I_{R_j}^2, \quad (2.4)$$

где E , I – величина источника ЭДС и протекающий через него ток, U_J , J – падение напряжения на зажимах источника тока и его ток, I_j – ток, протекающий через сопротивление R .

Мощность, выделяемая в нагрузках-сопротивлениях, всегда положительная.

Знак мощности источников ЭДС зависит от направлений ЭДС E и тока I_E , протекающего через них. Если направления совпадают (рис. 2.6,а), то мощность положительная (источник ЭДС отдает мощность), а если направления противоположные (рис. 2.6,б), то мощность отрицательная (источник ЭДС

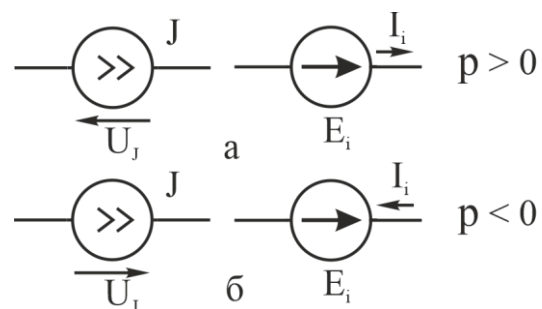


Рис. 2.6

потребляет мощность).

Мощность источника тока считается положительной, если направление его тока втекает в положительный полюс напряжения на нем. Для схемы, изображенной на рис 2.1, уравнение баланса мощности будет иметь вид

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2.$$

2.5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СЛОЖНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.5.1. Пример расчета сложной линейной электрической цепи постоянного тока по законам Кирхгофа

Задание. необходимо рассчитать сложную электрическую цепь постоянного тока (рис. 2.7) по законам Кирхгофа.

Исходные данные: $R_1 = 10 \text{ Ом}$,
 $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $R_4 = 40 \text{ Ом}$,
 $R_5 = 50 \text{ Ом}$, $R_6 = 60 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$,
 $J = 0.2 \text{ А}$, $E_6 = 60 \text{ В}$.

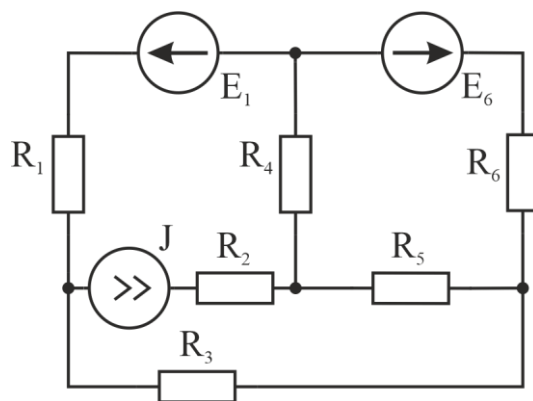


Рис. 2.7

Решение.

Расставим положительные направления токов в ветвях.

Определим количество узлов (У), ветвей (В), ветвей с источниками тока (V_J), количество независимых контуров (НК) (рис. 2.8):

$$U = 4, V = 6, \\ V_J = 1, \text{НК} = 3.$$

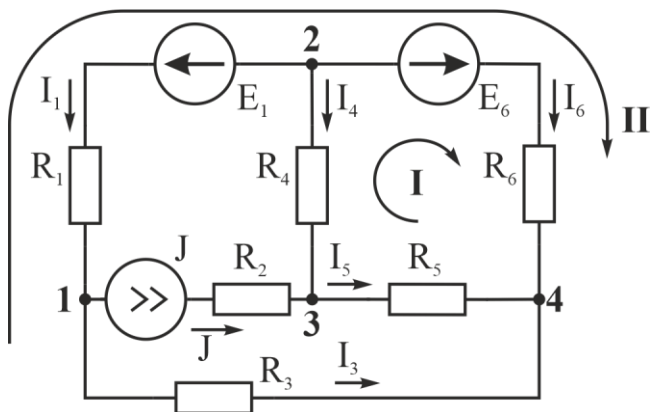


Рис. 2.8

Общее количество уравнений (ОКУ) по законам Кирхгофа равно количеству неизвестных токов, следовательно, количеству ветвей минус число ветвей с источниками тока. В данной схеме: число ветвей $V = 6$, число ветвей с источником тока $V_J = 1$. Таким образом, общее количество уравнений равно

$$\text{ОКУ} = V - V_J = 5.$$

Количество уравнений по первому закону Кирхгофа равно

$$U - 1 = 3.$$

Запишем уравнения по первому закону Кирхгофа для 1-го, 2-го и 3-го узлов:

$$\text{Узел 1:} \quad I_1 - J - I_3 = 0;$$

$$\text{Узел 2:} \quad -I_1 - I_4 - I_6 = 0;$$

Узел 3: $I_4 + J - I_5 = 0.$

Количество уравнений, записываемое по второму закону Кирхгофа, равно общему количеству уравнений минус число уравнений по первому закону Кирхгофа:

$$\text{ОКУ} - 3 = 2.$$

Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа:

контур I: $E_6 = I_6 R_6 - I_5 R_5 - I_4 R_4;$

контур II: $E_6 - E_1 = I_6 R_6 - I_3 R_3 - I_1 R_1.$

Таким образом, получили 5 уравнений (3 – по первому закону Кирхгофа и 2 – по второму закону Кирхгофа), из которых необходимо найти 5 неизвестных токов в ветвях I_1, I_3, I_4, I_5, I_6 :

$$\begin{cases} E_6 = I_6 R_6 - I_5 R_5 - I_4 R_4, \\ E_6 - E_1 = I_6 R_6 - I_3 R_3 - I_1 R_1, \\ I_1 - J - I_3 = 0, \\ -I_1 - I_4 - I_6 = 0, \\ I_4 + J - I_5 = 0. \end{cases}$$

Для решения данной системы уравнений используем матричный метод. Запишем данную систему в матричной форме:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B},$$

где $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -R_4 & -R_5 & R_6 \\ -R_1 & -R_2 & 0 & 0 & R_6 \end{pmatrix}$ – матрица системы, $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix}$ – столбец

неизвестных, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} J_2 \\ 0 \\ -J_2 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix}$ – столбец правых частей.

Тогда столбец неизвестных можно найти следующим образом:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}.$$

Подставим числовые значения и найдем искомые токи в ветвях:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -40 & -50 & 60 \\ 10 & -30 & 0 & 0 & 60 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0 \\ -0.2 \\ 60 \\ 50 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B},$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} -0.2105 \\ -0.4105 \\ -0.3825 \\ -0.1825 \\ 0.5930 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix},$$

$$I_1 = -0.2105 \text{ A}, \quad I_3 = -0.4105 \text{ A}, \\ I_4 = -0.3825 \text{ A}, \quad I_5 = -0.1825 \text{ A}, \quad I_6 = 0.5930 \text{ A}.$$

2.5.2. Пример расчета сложной линейной электрической цепи постоянного тока методом контурных токов

Задание. необходимо рассчитать сложную электрическую цепь постоянного тока (рис. 2.7) методом контурных токов.

Исходные данные: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $R_4 = 40 \text{ Ом}$, $R_5 = 50 \text{ Ом}$, $R_6 = 60 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $J = 0.2 \text{ А}$, $E_6 = 60 \text{ В}$.

Решение. Расчет по методу контурных токов (МКТ) позволяет сократить число уравнений в системе по сравнению с методом, основанным на законах Кирхгофа. Количество уравнений по МКТ определяется соотношением:

$$\text{НК} - \text{В}_J = 2,$$

т.е. такое же число уравнений, что и по второму закону Кирхгофа (рис. 2.9). Вводим расчетные контурные токи I_{11} и I_{22} , обозначаем ток J . Записываем уравнения по второму закону Кирхгофа для I_{11} и I_{22} . Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} E_6 = I_{11}(R_6 + R_5 + R_4) + I_{22}R_6 + J_2R_4, \\ E_6 - E_1 = I_{22}(R_1 + R_6 + R_3) + I_{11}R_6 - J_2R_1. \end{cases} \quad (2.5)$$

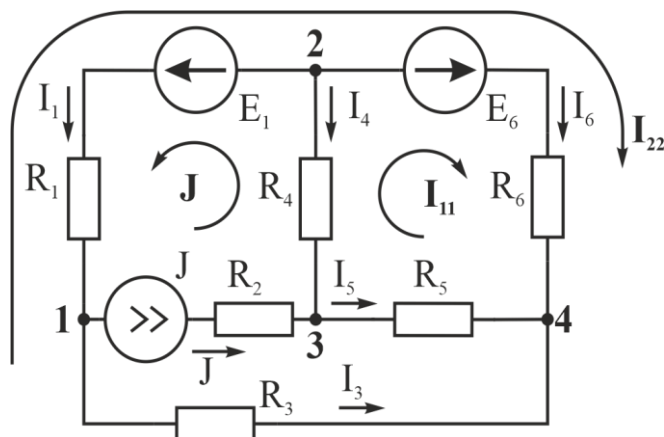


Рис. 2.9

Подставляем в систему уравнений (2.5) числовые значения, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 60 = 150I_{11} + 60I_{22} + 8, \\ 50 = 100I_{22} + 60I_{11} - 2. \end{cases} \quad (2.6)$$

Решаем систему методом подстановки. Выражаем из первого уравнения системы (2.6) ток I_{22} :

$$I_{22} = \frac{60 - 150I_{11} - 8}{60},$$

$$I_{22} = 0.8667 - 2.5I_{11} \quad (2.7)$$

и, подставляя его во второе уравнение системы (2.6),

$$50 = 100(0.8667 - 2.5I_{11} - 2,$$

находим I_{11}

$$50 = 86.67 - 250I_{11} + 60I_{11} - 2,$$

$$I_{11} = \frac{86.67 - 2 - 50}{250 - 60} = 0.1825 \text{ A.} \quad (2.8)$$

Находим I_{22} , подставляя полученное значение тока I_{11} в выражение (2.7):

$$I_{22} = 0.8667 - 2.5 \cdot 0.1825 = 0.4105 \text{ A.}$$

Выражаем исходные токи в ветвях I_1, I_3, I_4, I_5, I_6 через расчетные (контурные) токи I_{11} и I_{22} :

$$I_1 = J_2 - I_{22} = 0.2 - 0.4105 = -0.2105 \text{ A},$$

$$I_3 = -I_{22} = -0.4105 \text{ A},$$

$$I_4 = -J_2 - I_{11} = -0.2 - 0.1825 = -0.3825 \text{ A},$$

$$I_5 = -I_{11} = -0.1825 \text{ A},$$

$$I_6 = I_{11} + I_{22} = 0.1825 + 0.4105 = 0.5930 \text{ A}.$$

2.5.3. Пример расчета сложной линейной электрической цепи постоянного тока методом эквивалентного генератора

Задание. Дана сложная электрическая цепь постоянного тока (рис. 2.7). Необходимо методом эквивалентного генератора рассчитать ток, протекающий через сопротивление R_3 .

Исходные данные: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $R_4 = 40 \text{ Ом}$, $R_5 = 50 \text{ Ом}$, $R_6 = 60 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $J = 0.2 \text{ А}$, $E_6 = 60 \text{ В}$.

Решение. Обозначим ток, протекающий через сопротивление R_3 , как I_3 . Электрическую цепь относительно выделенной ветви (ветви с сопротивлением R_3) заменяем активным двухполюсником с эквивалентным ЭДС U_{xx} и входным сопротивлением $R_{вх}$ (рис. 2.10).

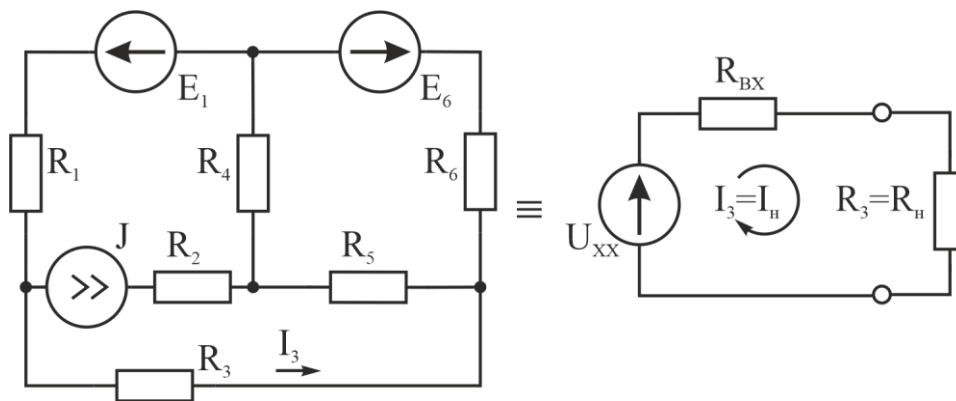


Рис. 2.10

Ток в выделенной ветви определяется по формуле

$$I_H = I_3 = \frac{U_{xx}}{R_{Bx} + R_3} = \frac{U_{xx}}{R_{Bx} + R_H}.$$

Рассчитаем входное сопротивление R_{Bx} . Для этого из исходной электрической цепи исключаем сопротивление R_H , источники энергии заменяем их внутренним сопротивлением (рис. 2.11). В случае идеальных источников энергии источник ЭДС заменяем проводником, источник тока – разрывом.

Далее, используя метод последовательных преобразований, рассчитываем входное сопротивление R_{Bx} :

$$R_{45} = R_4 + R_5 = 90 \text{ Ом},$$

$$R_{456} = \frac{R_{45}R_6}{R_{45} + R_6} = 36 \text{ Ом},$$

$$R_{Bx} = R_{456} + R_1 = 46 \text{ Ом}.$$

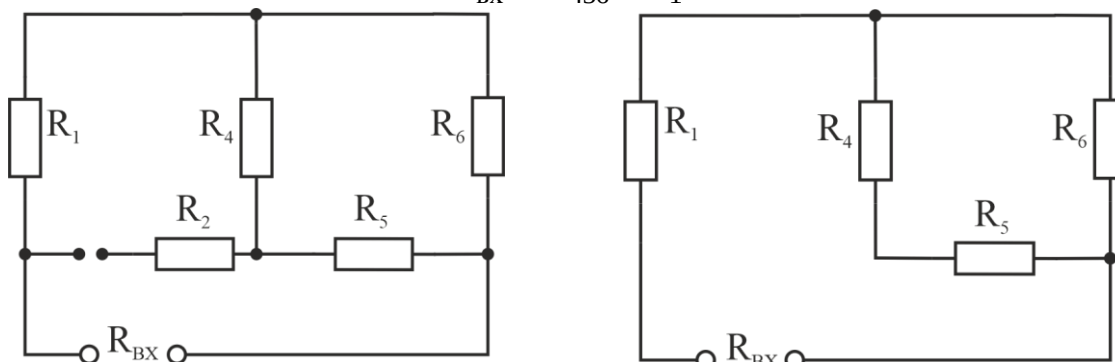


Рис. 2.11

Рассчитываем напряжение холостого хода U_{xx} . Для определения напряжения холостого хода U_{xx} выделенная ветвь отключается и одним из методов рассчитывается напряжение между зажимами (рис. 2.12).

В данном случае для расчета U_{xx} составляем уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$E_1 - E_6 = U_{xx} - I'_6 R_6 - I'_1 R_1,$$

откуда получаем выражение для U_{xx} :

$$U_{xx} = E_1 - E_6 + I'_6 R_6 + I'_1 R_1.$$

Исключим из схемы разомкнутые ветви и определим токи, необходимые для расчета U_{xx} :

$$I'_1 = J_2 = 0.2 \text{ А}.$$

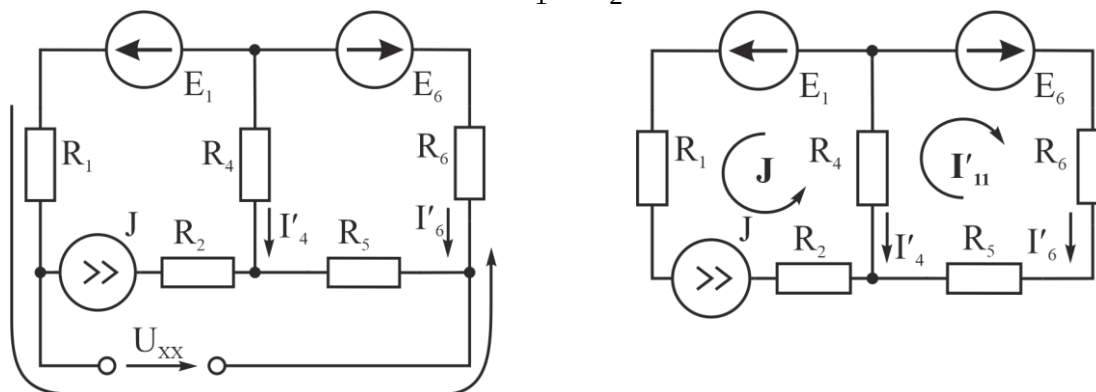


Рис. 2.12

Используем метод контурных токов для нахождения тока I'_6 . Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для контурного тока I'_6 :

$$E_6 = I'_{11}(R_6 + R_5 + R_4) + J_2 R_4.$$

Выразим ток I'_{11} :

$$I'_{11} = \frac{E_6 - J_2 R_4}{R_6 + R_5 + R_4} = \frac{52}{150} = 0.3467 \text{ A},$$

$$I'_6 = I'_{11} = 0.3467 \text{ A}.$$

Подставим найденные токи в выражение для U_{xx} :

$$U_{xx} = E_1 - E_6 + I'_6 R_6 + I'_1 R_1,$$

$$U_{xx} = 10 - 60 + 20.8 - 2 = -32.2 \text{ В}.$$

Найдем искомый ток

$$I_3 = I_n = \frac{-31.2}{46 + 30} = -0.4105 \text{ A}.$$

2.5.4. Проверка соблюдения первого и второго законов Кирхгофа для всех контуров и узлов схемы

Задание. Дана сложная электрическая цепь постоянного тока (рис. 2.8) в которой одним из методов определены токи в ветвях. Необходимо проверить соблюдение первого и второго законов Кирхгофа для всех узлов и всех контуров схемы.

Исходные данные: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $R_4 = 40 \text{ Ом}$, $R_5 = 50 \text{ Ом}$, $R_6 = 60 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $J = 0.2 \text{ А}$, $E_6 = 60 \text{ В}$, $I_1 = -0.2105 \text{ А}$, $I_3 = -0.4105 \text{ А}$, $I_4 = -0.3825 \text{ А}$, $I_5 = -0.1825 \text{ А}$, $I_6 = 0.5930 \text{ А}$.

Решение. Проверим соблюдение первого закона Кирхгофа для всех узлов схемы при заданных токах в ветвях электрической цепи (рис. 2.13,а).

Узел 1:
$$I_1 - J_2 - I_3 = 0,$$

$$-0.2105 - 0.2 - (-0.4105) = 0.$$

Узел 2:
$$-I_1 - I_4 - I_6 = 0,$$

$$-(-0.2105) - (-0.3825) - 0.5930 = 0.$$

Узел 3:
$$J_2 + I_4 - I_5 = 0,$$

$$0.2 + (-0.3825) - (-0.1825) = 0.$$

Узел 4:
$$I_3 + I_5 + I_6 = 0,$$

$$-0.4105 - 0.1825 + 0.5930 = 0.$$

Первый закон Кирхгофа для всех узлов схемы выполняется.

Найдем падение напряжения на источнике тока U_J . Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для контура $J - R_2 - R_5 - R_3$:

$$0 = -U_J + J_2 R_2 + I_5 R_5 - I_2 R_3,$$

выразим U_J :

$$U_J = J R_2 + I_5 R_5 - I_3 R_3,$$

$$U_J = 4 + (-9.125) - (-12.32) = 7.195 \text{ В}.$$

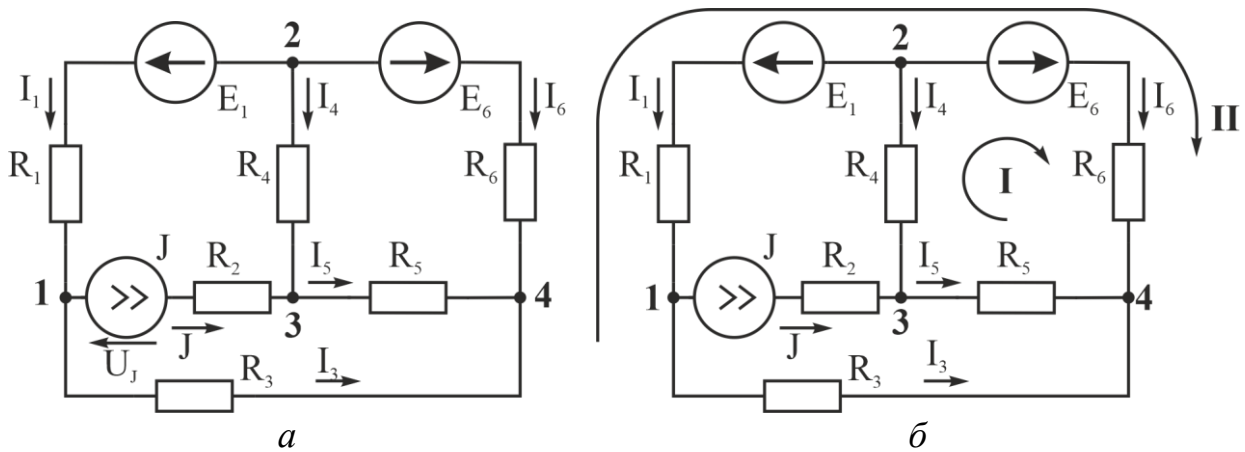


Рис. 2.13

Проверим соблюдение второго закона Кирхгофа для всех контуров схемы (рис. 2.13, б)

Контур I:

$$\begin{aligned} E_1 - E_6 &= I_1 R_1 + I_3 R_3 - I_6 R_6, \\ -50 &= -2.105 - 12.32 - 35.58, \\ -50 &\approx -50.005. \end{aligned}$$

Контур II:

$$\begin{aligned} E_1 &= I_1 R_1 - U_J + J R_2 - I_4 R_4, \\ 10 &= -2.105 - 7.195 + 4 - (-15.3), \\ 10 &= 10. \end{aligned}$$

Контур III:

$$\begin{aligned} E_6 &= I_6 R_6 - I_5 R_5 - I_4 R_4, \\ 60 &= 35.58 - (-9.125) - (-15.3), \\ 60 &\approx 60.005. \end{aligned}$$

Контур IV:

$$\begin{aligned} 0 &= -U_J + J R_2 + I_5 R_5 - I_3 R_3, \\ 0 &= -7.195 + 4 + (-9.125) - (-12.32), \\ 0 &= 0. \end{aligned}$$

Контур V:

$$\begin{aligned} E_6 - E_1 &= I_6 R_6 - I_5 R_5 - J R_2 + U_J - I_1 R_1, \\ 50 &= 35.58 - (-9.125) - 4 + 7.195 - (-2.105), \\ 50 &\approx 50.005. \end{aligned}$$

Контур VI:

$$\begin{aligned} E_1 &= I_1 R_1 + I_3 R_3 - I_5 R_5 - I_4 R_4, \\ 10 &= -2.105 - 12.32 - (-9.125) - (-15.3), \\ 10 &= 10. \end{aligned}$$

Контур VII:

$$\begin{aligned} E_6 &= I_6 R_6 - I_3 R_3 - U_J + J R_2 - I_4 R_4, \\ 60 &= 35.58 - (-12.32) - 7.195 + 4 - (-15.3), \\ 60 &\approx 60.005. \end{aligned}$$

Второй закон Кирхгофа для всех контуров схемы выполняется.

Первый и второй законы Кирхгофа соблюдаются для всех узлов и всех контуров схемы.

2.5.5. Проверка соблюдения баланса мощности для схемы

Задание. Дана сложная электрическая цепь постоянного тока (рис. 2.8) в которой одним из методов определены токи в ветвях. Необходимо проверить соблюдение баланса мощности для заданной схемы.

Исходные данные: $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $R_4 = 40 \text{ Ом}$, $R_5 = 50 \text{ Ом}$, $R_6 = 60 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $J = 0.2 \text{ А}$, $E_6 = 60 \text{ В}$, $I_1 = -0.2105 \text{ А}$, $I_3 = -0.4105 \text{ А}$, $I_4 = -0.3825 \text{ А}$, $I_5 = -0.1825 \text{ А}$, $I_6 = 0.5930 \text{ А}$.

Решение. Алгебраическая сумма мощностей, отдаваемых источниками энергии согласно формуле (2.4), должна быть равна сумме мощностей, выделяемых в нагрузках.

Найдем падение напряжения на источнике тока U_J (см. п.2.5.4).

Для заданной схемы уравнение баланса мощности будет иметь вид:

$$I_1 E_1 + I_6 E_6 + J U_J = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6, \\ - 2.105 + 35.58 + 1.439 = 0.4431 + 0.8 + 5.055 + 5.853 + 1.665 + 21.10, \\ 34.91 \approx 34.62.$$

2.6. ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА № 2. РАСЧЕТ СЛОЖНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Необходимо рассчитать:

- сложную электрическую цепь по законам Кирхгофа;
- сложную электрическую цепь методом контурных токов;
- ток в одной из ветвей схемы (задается преподавателем) методом эквивалентного генератора.

Необходимо проверить:

- соблюдение первого и второго законов Кирхгофа для всех контуров и узлов схемы;
- соблюдение баланса мощности для схемы.

Исходные данные. Определить значения сопротивлений резисторов, источников ЭДС и тока в соответствии с номером группы и номером по журналу:

- номер группы $N_{\text{гр}} = \frac{624}{abc}$, номер студента по журналу $N_{\text{ст}} = \frac{12}{km}$;
- номер схемы для расчета равен номеру студента по журналу $N_{\text{ст}}$ (рис. 2.14), если номер по списку в журнале больше 26, то номер схемы для расчета равен $N_{\text{ст}} - 26$;
- сопротивление $R_1 = 10(1+k)$, [Ом];
- сопротивление $R_2 = 10(1+|c-k|)$, [Ом];
- сопротивление $R_3 = 10(1+|a-m|)$, [Ом];
- сопротивление $R_4 = 10(2+k)$, [Ом];
- сопротивление $R_5 = 10(2+|c-k|)$, [Ом];
- сопротивление $R_6 = 10(2+|a-m|)$, [Ом].
- для $N_{\text{ст}} \leq 26$ – $E_1 = 12 \text{ В}$, $E_2 = 5 \text{ В}$, $J = 0.2+0.1m \text{ А}$;

- для №ст > 26 – $E_1 = 15\text{ В}$, $E_2 = 10\text{ В}$, $J = 0.2 + 0.1m\text{ А}$ (если один из источников ЭДС отсутствует в схеме, то его значение принимаем равным 0).

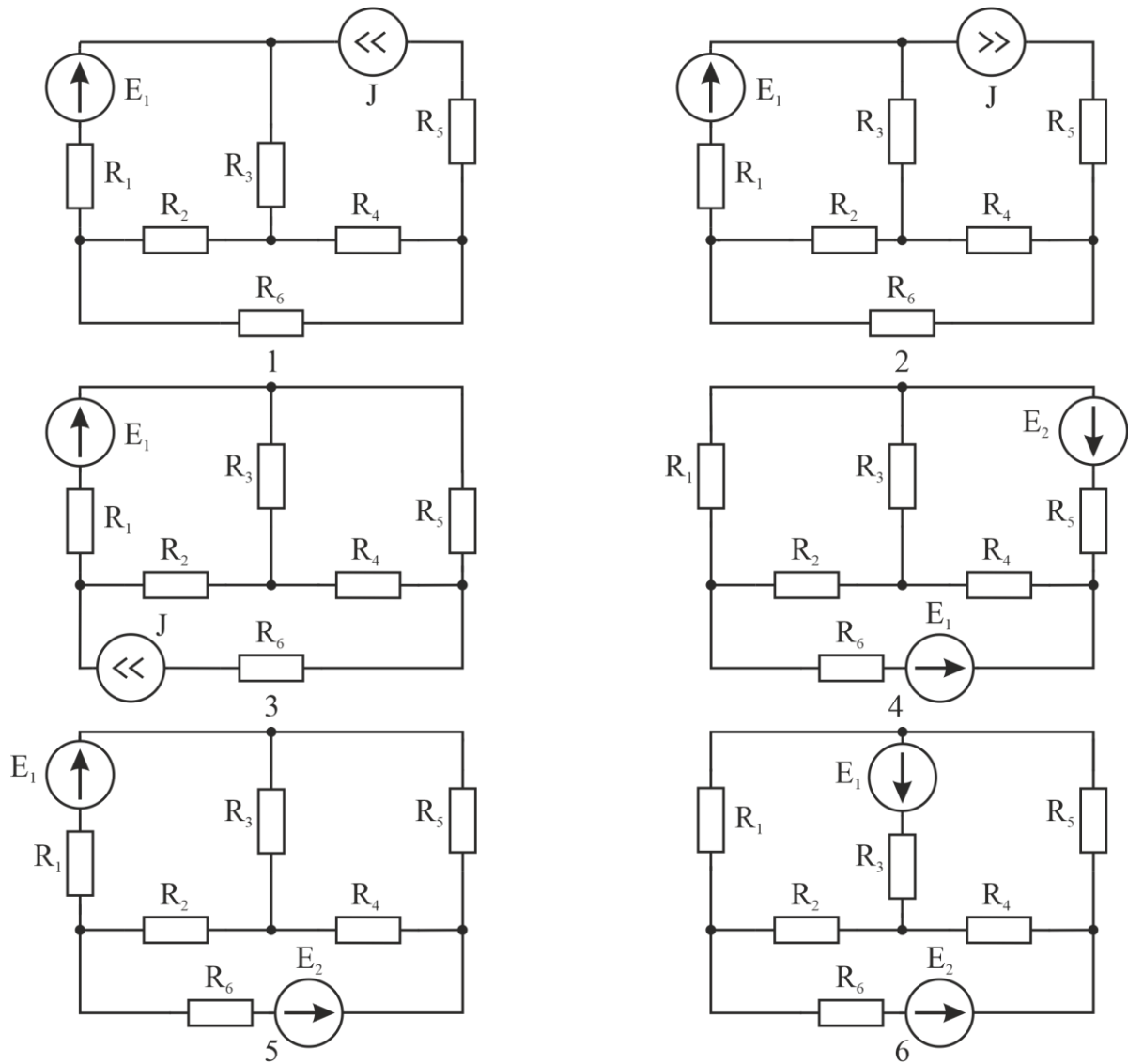


Рис. 2.14 (начало)

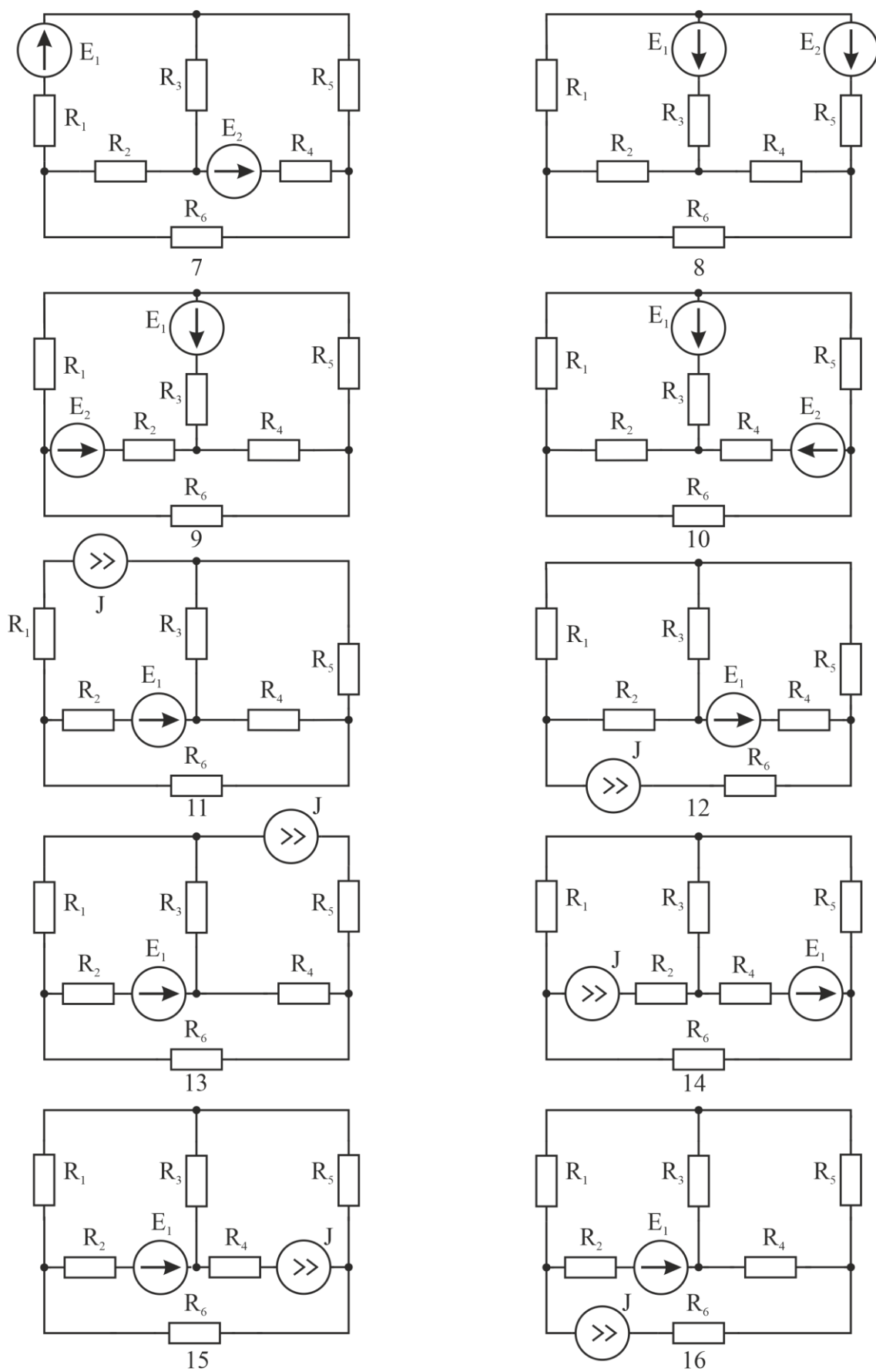


Рис. 2.14 (продолжение)

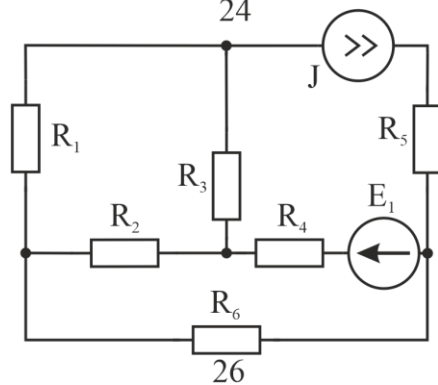
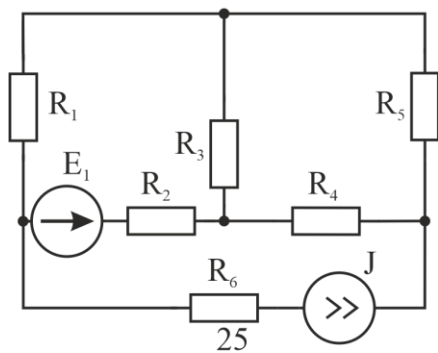
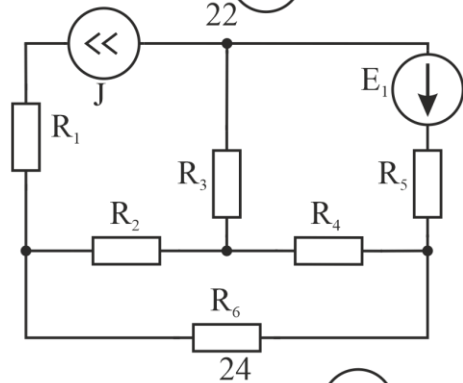
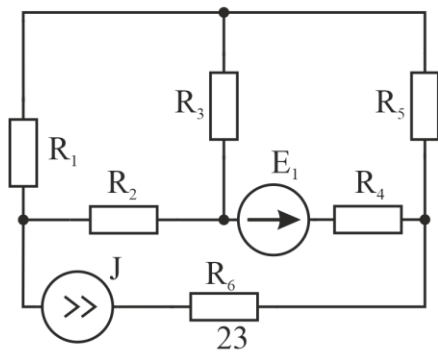
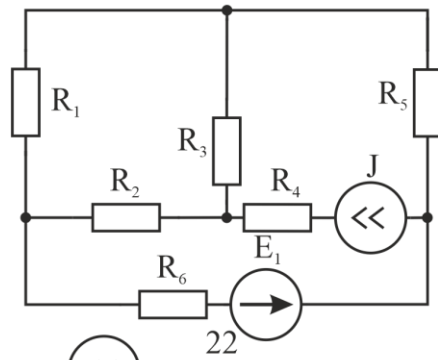
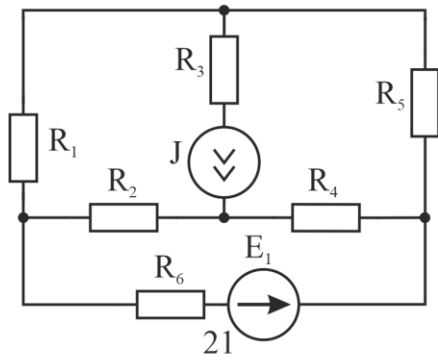
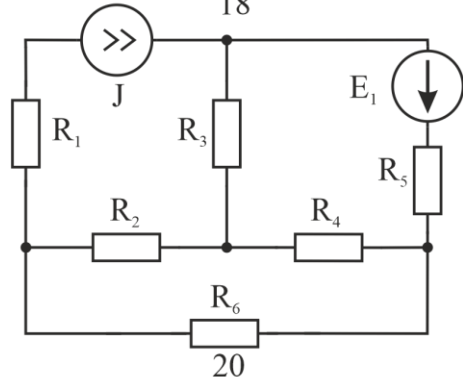
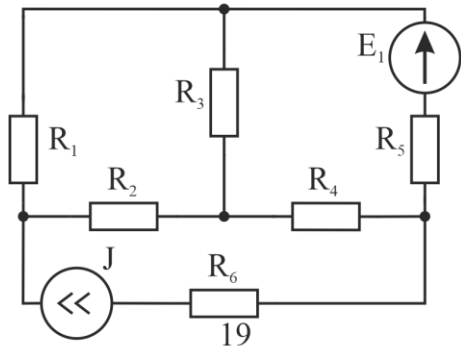
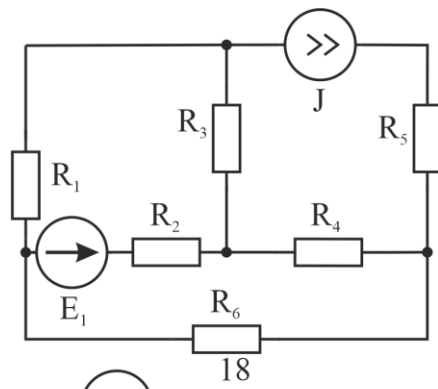
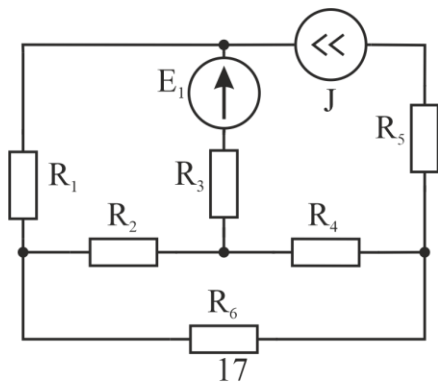


Рис. 2.14 (окончание)

3. РАСЧЕТ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

3.1. ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Переменным (рис. 3.1) называется ток, изменяющийся во времени по величине или направлению. Наиболее распространенным является переменный синусоидальный ток, описываемый функцией

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (3.1)$$

где I_m [А], ω [рад/с], φ [радианы или градусы] – амплитуда, угловая частота и начальная фаза синусоидального тока. Кроме угловой частоты ω , используется линейная частота f [Гц]:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (3.2)$$

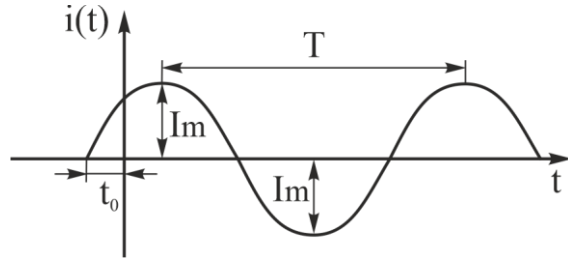


Рис. 3.1

С линейной частотой f связан период колебания T [с]:

$$T = \frac{1}{f}. \quad (3.3)$$

Начальная фаза φ характеризует сдвиг колебания во времени относительно начала координат на величину $t_0 = -\varphi/\omega$.

В электронике широко применяются периодические ЭДС, напряжения и токи различной формы (прямоугольной, треугольной, трапецеидальной, синусоидальной). Первичные источники электроэнергии (генераторы электростанций) создают ЭДС, изменяющуюся по синусоидальному закону.

Мгновенная мощность синусоидального тока является переменной величиной $p(t) = Ri^2(t)$, поэтому при оценке энергии, выделяемой в нагрузке за период, используют среднюю мощность

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T Ri^2(t) dt. \quad (3.4)$$

Для расчета средней мощности вводят понятие действующего (эффективного) значения переменного тока I . Действующим называется такое значение переменного тока, которое вызывает выделение в активной нагрузке R энергии, равной энергии, выделяющейся от протекания эквивалентного постоянного тока. То есть средняя мощность переменного тока $P_{\text{ср}}$ должна равняться мощности постоянного тока $P = RI^2$. Отсюда:

$$RI^2 = \frac{1}{T} \int_0^T Ri^2(t) dt = \frac{R}{T} \int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t dt = \frac{RI_m^2}{T} \int_0^T \frac{(1 - \cos 2\omega t)}{2} dt \frac{RI_m^2}{2},$$

$$I^2 = \frac{I_m^2}{2},$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cong 0.7071 I_m.$$

При вычислении действующего значения напряжения получается аналогичный результат: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

Для расчета электрических цепей синусоидального тока используется символический метод, основанный на комплексном представлении синусоидального тока. Для использования символического метода при расчете цепей синусоидального тока необходимо перейти от дифференциальных уравнений к алгебраическим.

Законы Ома и Кирхгофа для цепей синусоидального тока в комплексной (символической) форме имеют вид:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}, \quad \sum_{k=1}^n \dot{I}_k = 0, \quad \sum_{k=1}^n \dot{Z}_k \dot{I}_k = \sum_{l=1}^m \dot{E}_l.$$

Проверка расчетов цепей синусоидального тока по законам Кирхгофа в цепях синусоидального тока осуществляется при помощи векторных и топографических диаграмм исследуемой цепи, построенных на комплексной плоскости.

3.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Задание. Необходимо методом последовательных преобразований рассчитать цепь синусоидального тока (рис. 3.2), методом эквивалентного генератора рассчитать ток в выделенной ветви, построить ее векторную и топографическую диаграммы, построить графики мгновенных значений напряжения, тока и мощности на источнике ЭДС, определить активную, реактивную, полную мощности, коэффициент мощности на источнике ЭДС и построить треугольник мощностей.

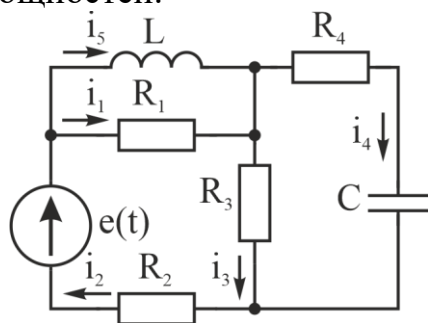


Рис. 3.2

Исходные данные для расчета:

$e(t) = 10 \sin(\omega t + 90^\circ)$ В, $f = 1000$ Гц,
 $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 3$ Ом,
 $R_4 = 4$ Ом, $L = 1$ мГн, $C = 10$ мкФ.

Решение. Найдем циклическую частоту

$$\omega = 2\pi f = 6.283 \cdot 10^3 \text{ рад/с.}$$

Найдем значения реактивных сопротивлений:

$$X_L = \omega L,$$

$$X_L = 6.283 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 6.283 \text{ Ом},$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{6.283 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 15.92 \text{ Ом}.$$

Применяем символический метод расчета. Расчет ведем в действующих значениях (рис. 3.3):

$$\dot{E} = \frac{10}{\sqrt{2}} e^{j90^\circ} = 7.07 e^{j90^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{Z}_L = jX_L = j6.283 = 6.283 e^{j90^\circ} \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_C = -jX_C = -j15.92 = 15.92 e^{-j90^\circ} \text{ Ом}.$$

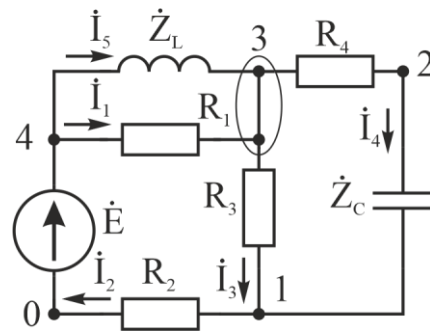


Рис. 3.3

Производим последовательные преобразования (рис. 3.4, 3.5, 3.6):

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{Z}_L R_1}{\dot{Z}_L + R_1} = \frac{6.283 e^{-j90^\circ} \cdot 10}{j6.283 + 10} = \frac{62.8 e^{j90^\circ}}{11.81 e^{j32^\circ}},$$

$$\dot{Z}_1 = 5.320 e^{j58^\circ} = 2.830 + j4.505 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_2 = R_4 + \dot{Z}_C = 4 - j15.92 = 16.4 e^{-j76^\circ} \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_3 = \frac{\dot{Z}_2 R_3}{\dot{Z}_2 + R_3} = \frac{16.41 e^{-j76^\circ} \cdot 3}{4 - j15.92 + 3} = \frac{49.23 e^{-j76^\circ}}{17.39 e^{-j66^\circ}} = 2.831 e^{-j10^\circ} = 2.792 - j0.4738 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z} = R_1 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_3 = 2 + 2.830 + j4.505 + 2.792 - j0.4738 = 7.622 + j4.505 = 8.622 e^{j28^\circ} \text{ Ом}.$$

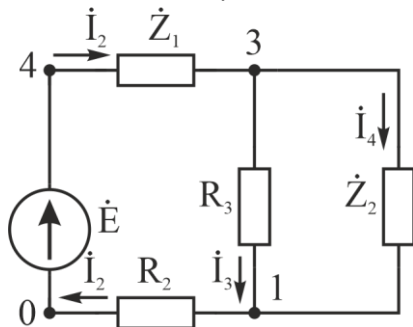


Рис. 3.4

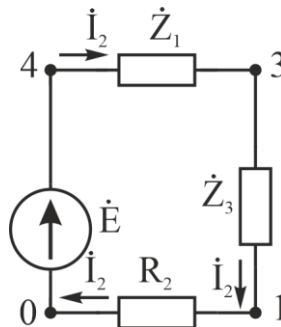


Рис. 3.5

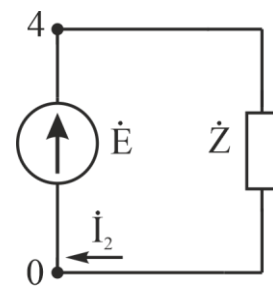


Рис. 3.6

Найдем комплексный ток $\dot{I}_2$ по закону Ома (рис. 3.6):

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} = \frac{7.07 e^{j90^\circ}}{8.622 e^{j28^\circ}} = 0.820 e^{j62^\circ} \text{ А}.$$

Найдем комплексные напряжения $\dot{U}_{01}, \dot{U}_{13}, \dot{U}_{34}$ (рис. 3.5):

$$\dot{U}_{34} = \dot{I}_2 \dot{Z}_1 = 0.820 e^{j62^\circ} \cdot 5.320 e^{j58^\circ} = 4.3624 e^{j120^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{13} = \dot{I}_2 \dot{Z}_3 = 0.820 e^{j62^\circ} \cdot 2.831 e^{-j10^\circ} = 2.321 e^{j52^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{01} = \dot{I}_2 R_2 = 0.820 e^{j62^\circ} \cdot 2 = 1.64 e^{j62^\circ} \text{ В}.$$

Рассчитаем комплексные токи $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_5$ (рис. 3.3):

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{12}}{R_1} = \frac{4.3624 e^{j120^\circ}}{10} = 0.43624 e^{j120^\circ} \text{ А},$$

$$\dot{I}_5 = \frac{\dot{U}_{12}}{\dot{Z}_L} = \frac{4.3624e^{j120^\circ}}{6.283e^{j90^\circ}} = 0.694e^{j30^\circ} \text{ А.}$$

Рассчитаем комплексные токи $\dot{I}_3$ и $\dot{I}_4$ (рис. 3.4):

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{23}}{R_3} = \frac{2.321e^{j52^\circ}}{3} = 0.774e^{j52^\circ} \text{ А,}$$

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_{23}}{\dot{Z}_2} = \frac{2.321e^{j52^\circ}}{16.41e^{-j76^\circ}} = 0.141e^{j128^\circ} \text{ А.}$$

Найдем комплексные значения напряжений $\dot{U}_{R4}$ и $\dot{U}_C$ (рис. 3.3):

$$\dot{U}_{R4} = \dot{I}_4 R_4 = 0.141e^{j128^\circ} \cdot 4 = 0.564e^{j128^\circ} \text{ В.}$$

$$\dot{U}_C = \dot{I}_4 \dot{Z}_4 = 0.141e^{j128^\circ} \cdot 15.92e^{-j90^\circ} = 2.24e^{j38^\circ} \text{ В.}$$

Используя метод эквивалентного генератора, рассчитаем ток I_4 (рис. 3.3). Электрическую цепь относительно выделенной ветви (ветвь R_4 - Z_C) заменяем активным двухполюсником с эквивалентным ЭДС $\dot{U}_{xx}$ и входным сопротивлением $\dot{Z}_{bx}$ (рис. 3.7). Ток в выделенной ветви $I_H = I_4$ определяем по закону Ома:

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{U}_{xx}}{\dot{Z}_{bx} + \dot{Z}_H}, \text{ где } \dot{Z}_H = R_4 + \dot{Z}_C.$$

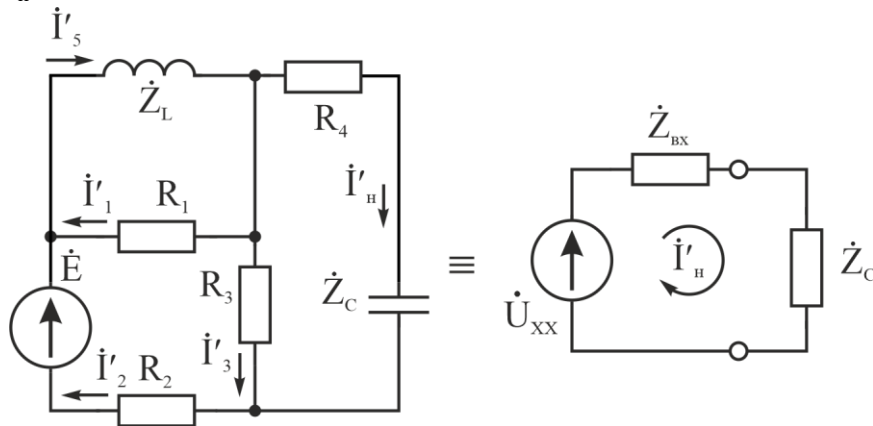


Рис. 3.7

Рассчитаем входное сопротивление $\dot{Z}_{bx}$. Для этого в исходной электрической цепи отключаем сопротивление $\dot{Z}_H$, источники энергии заменяем их внутренним сопротивлением (источник ЭДС – проводником; источник тока – разрывом), реактивные элементы – их комплексными сопротивлениями (рис. 3.8).

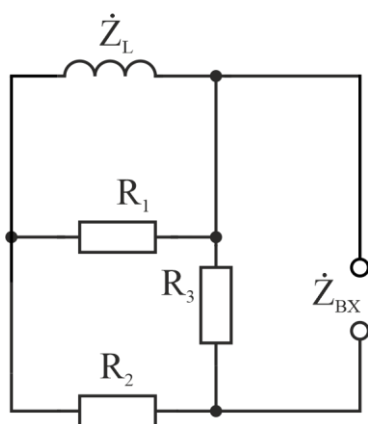


Рис. 3.8

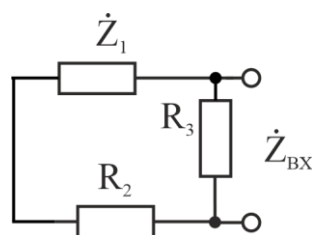


Рис. 3.9

Далее, используя метод последовательных преобразований, рассчитываем входное сопротивление (рис. 3.9):

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{Z}_L R_1}{\dot{Z}_L + R_1} = \frac{6.283e^{j90^\circ} \cdot 10}{j6.283 + 10} = \frac{62.8e^{j90^\circ}}{11.81e^{j32^\circ}} = 5.320e^{j58^\circ} = 2.830 + j4.505 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_2 = R_2 + \dot{Z}_1 = 2 + 2.830 + j4.505 = 4.83 + j4.505 = 6.6048e^{j43^\circ} \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_{BX} = \frac{\dot{Z}_2 R_3}{\dot{Z}_2 + R_3} = \frac{6.605e^{j43^\circ} \cdot 3}{4.83 + j4.505 + 3} = \frac{19.815e^{j43^\circ}}{9.033e^{j30^\circ}} = 2.193e^{j13^\circ} = 2.136 + j0.497 \text{ Ом}.$$

Рассчитываем напряжение холостого хода. Для определения напряжения холостого хода \$\dot{U}_{xx}\$ выделенная ветвь отключается и одним из методов рассчитывается напряжение между зажимами. В данном случае составляем уравнение по второму закону Кирхгофа (рис. 3.10):

$$\dot{E} = \dot{U}_{xx} + \dot{I}'_5 \dot{Z}_L + \dot{I}'_2 R_2,$$

из него выражаем \$\dot{U}_{xx}\$:

$$\dot{U}_{xx} = \dot{E} - \dot{I}'_5 \dot{Z}_L - \dot{I}'_2 R_2.$$

Исключаем из схемы разомкнутые ветви и определяем токи \$\dot{I}'_2\$ и \$\dot{I}'_5\$, необходимые для расчета \$\dot{U}_{xx}\$.

Используем метод контурных токов. Запишем систему уравнений для контурных токов \$\dot{I}'_{11}\$, \$\dot{I}'_{22}\$ (рис. 3.10):

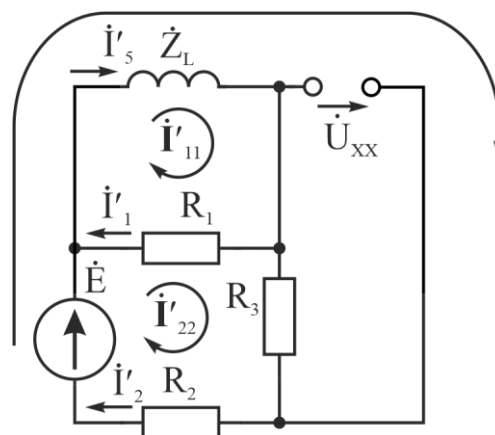


Рис. 3.10

$$\begin{cases} \dot{E} = \dot{I}'_{22}(R_1 + R_2 + R_3) - \dot{I}'_{11}R_1, \\ 0 = \dot{I}'_{11}(\dot{Z}_L + R_1) - \dot{I}'_{22}R_1. \end{cases} \quad (3.5)$$

Выражаем $\dot{I}'_{22}$ из первого уравнения системы (3.5):

$$\begin{aligned}\dot{I}'_{22} &= \frac{\dot{I}'_{11}R_1 + \dot{E}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{10\dot{I}'_{11} + 7.07e^{j90^\circ}}{10 + 2 + 3} = \\ &= 1.5\dot{I}'_{11} + 0.471e^{j90^\circ} = 1.5\dot{I}'_{11} + j0.471.\end{aligned}\quad (3.6)$$

Подставляем $\dot{I}'_{22}$ во второе уравнение системы (3.5) и выражаем из него $\dot{I}'_{11}$ (3.7):

$$\dot{I}'_{11}(\dot{Z}_L + R_1) - \frac{\dot{I}'_{11}R_1 + \dot{E}}{R_1 + R_2 + R_3}R_1 = 0. \quad (3.7)$$

Подставляем значения в (3.7) и находим $\dot{I}'_{11}$:

$$\begin{aligned}\dot{I}'_{11} &= \frac{\dot{E} \cdot R_1}{(\dot{Z}_L + R_1) \cdot (R_1 + R_2 + R_3) - R_1^2} = \frac{7.07e^{j90^\circ} \cdot 10}{11.81e^{j32^\circ} \cdot 15 - 100} = \frac{70.7e^{j90^\circ}}{177.15e^{j32^\circ} - 100} = \\ &= \frac{70.7e^{j90^\circ}}{150.232 + j93.875 - 100} = \frac{70.7e^{j90^\circ}}{106.470e^{j62^\circ}} = 0.664e^{j28^\circ} = 0.585 + j0.311 \text{ A}.\end{aligned}$$

Подставляем найденное значение $\dot{I}'_{11}$ в (3.6) и находим $\dot{I}'_{22}$:

$$\begin{aligned}\dot{I}'_{22} &= \frac{\dot{I}'_{11}R_1 + \dot{E}}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(0.585 + j0.311) \cdot 10 + j7.07}{15} = \frac{5.85 + j10.18}{15} = \frac{11.741e^{j60^\circ}}{15} = \\ &= 0.783e^{j60^\circ} = 0.392 + j0.678 \text{ A}.\end{aligned}\quad (3.8)$$

Далее находим $\dot{I}'_2$ и $\dot{I}'_5$ по найденным значениям $\dot{I}'_{11}$ и $\dot{I}'_{22}$:

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}'_{22} = 0.392 + j0.678 = 0.783e^{j60^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}'_5 = \dot{I}'_{11} = 0.585 + j0.311 = 0.664e^{j28^\circ} \text{ A}.$$

Далее находим $\dot{U}_{XX}$:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{XX} &= \dot{E} - \dot{I}'_{11}\dot{Z}_L - \dot{I}'_{22}R_2 = j7.07 - (0.585 + j0.311) \cdot j6.283 - (0.392 + j0.678) \cdot 2 = \\ &= j7.07 + 1.954 - j3.676 - 0.784 - j1.356 = 1.17 + j2.038 = 2.350e^{j60^\circ} \text{ В}.\end{aligned}$$

Далее находим I_H и соответственно $\dot{I}_4$:

$$\begin{aligned}\dot{I}_4 &= \frac{\dot{U}_{XX}}{\dot{Z}_{BX} + \dot{Z}_H} = \frac{2.350e^{j60^\circ}}{2.193e^{j13^\circ} + 16.415e^{-j76^\circ}} = \frac{2.350e^{j60^\circ}}{2.136 + j0.497 + 4 - j15.92} = \\ &= \frac{2.350e^{j60^\circ}}{6.136 - j15.423} = \frac{2.350e^{j60^\circ}}{16.6e^{-j68^\circ}} = 0.141e^{j128^\circ} = -0.087 + j0.112 \text{ A}.\end{aligned}$$

По результатам расчета были получены следующие токи в ветвях и напряжения на элементах:

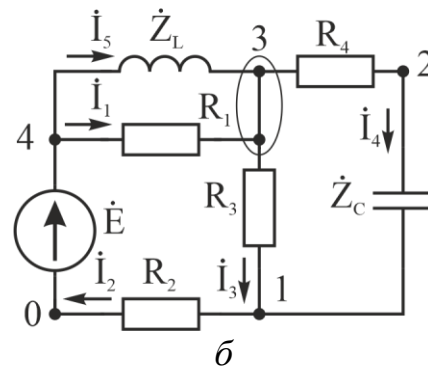
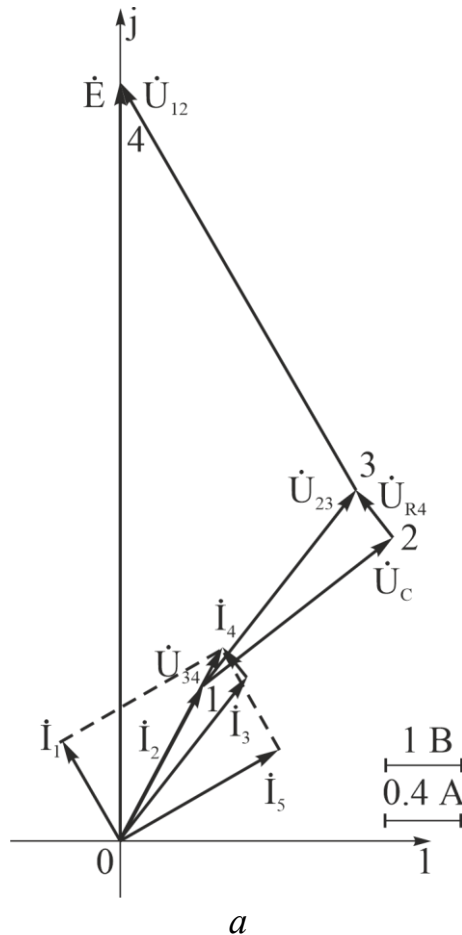
$$\dot{I}_1 = 0.43624e^{j120^\circ} \text{ A}, \quad \dot{I}_2 = 0.820e^{j62^\circ} \text{ A}, \quad \dot{I}_3 = 0.774e^{j52^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_4 = 0.141e^{j128^\circ} \text{ A}, \dot{I}_5 = 0.694e^{j30^\circ} \text{ A},$$

$$U_{34} = 4.3624e^{j120^\circ} \text{ В}, U_{13} = 2.321e^{j52^\circ} \text{ В}, U_{01} = 1.64e^{j62^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{R4} = 0.564e^{j128^\circ} \text{ В}, \dot{U}_C = 2.24e^{j38^\circ} \text{ В}.$$

Построим векторно-топографическую диаграмму (рис. 3.11).



Векторная диаграмма (токов)

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_5 = \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_4 + \dot{I}_3 = \dot{I}_2$$

в

Топографическая диаграмма
(напряжений)

$$E = U_{01} + U_{13} + U_{34}$$

$$U_{13} = U_{R4} + U_C$$

г

Рис. 3.11

Построим графики мгновенных значений напряжения, тока и мощности на источнике ЭДС. Для этого перейдем от изображений напряжений и токов к мгновенным значениям:

$$\dot{E} = 7.07e^{j90^\circ} \Rightarrow e(t) = 7.07 \cdot \sqrt{2} \sin(6283t + 90^\circ) \text{ В},$$

$$\dot{I}_2 = 0.82e^{j62^\circ} \Rightarrow i_2(t) = 0.82 \cdot \sqrt{2} \sin(6283t + 62^\circ) \text{ А}.$$

Найдем мощность, выделяемую источником ЭДС:

$$p(t) = e(t) \cdot i_2(t),$$

$$p(t) = 10 \sin(6283t + 90^\circ) \cdot 1.160 \sin(6283t + 62^\circ),$$

$$p(t) = 11.16 \sin(6283t + 90^\circ) \cdot \sin(6283t + 62^\circ),$$

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)],$$

$$p(t) = 5.8 [\cos(6283t + 90^\circ - 6283t - 62^\circ) - \cos(6283t + 90^\circ + 6283t + 62^\circ)],$$

$$p(t) = 5.8 [\cos(28^\circ) - \cos(12570t + 152^\circ)],$$

$$p(t) = 5.8[0.8829 - \cos(12570t + 152^\circ)],$$

$$p(t) = 5.12 - 5.8\cos(12570t + 152^\circ) \text{ Вт.}$$

Таким образом, получили следующие выражения для мгновенных значений напряжения, тока и мощности на источнике ЭДС:

$$e(t) = 10 \sin(6283t + 90^\circ) \text{ В,}$$

$$i_2(t) = 1.160 \sin(6283t + 62^\circ) \text{ А,}$$

$$p(t) = 5.12 - 5.8 \cos(12570t + 152^\circ) \text{ Вт.}$$

Построим графики данных функций в одной системе координат (рис. 3.12).

e , В; i , А; p , Вт

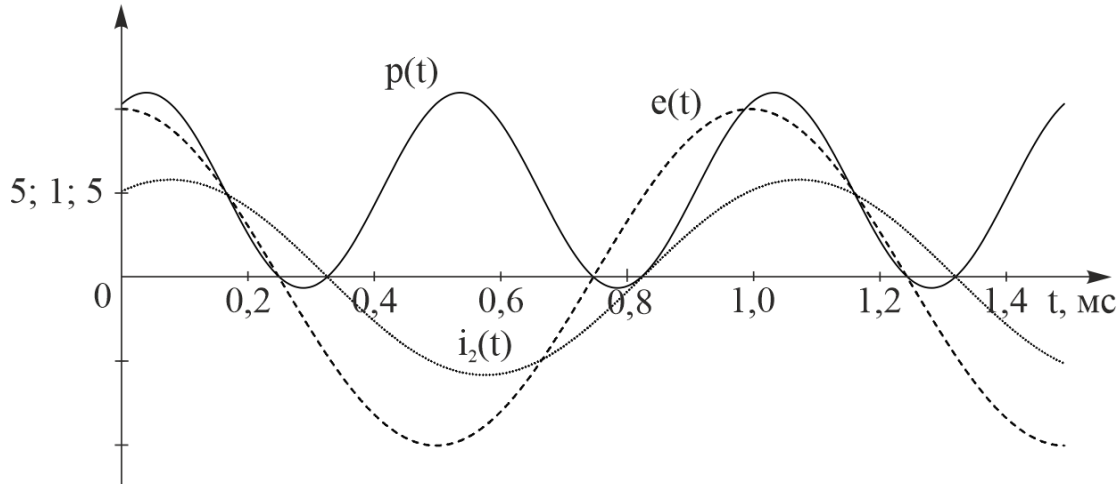


Рис. 3.12

Определим комплексную мощность в источнике ЭДС:

$$\dot{S} = \dot{E} \cdot \dot{I}_2^*,$$

$$\dot{E} = \frac{10}{\sqrt{2}} e^{j90^\circ} = 7.071 e^{j90^\circ},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{1.16}{\sqrt{2}} e^{j62^\circ} = 0.820 e^{j62^\circ}, \quad \dot{I}_2^* = 0.820 e^{-j62^\circ},$$

$$\dot{S} = 7.071 e^{j90^\circ} \cdot 0.820 e^{-j62^\circ} = 5.798 e^{j28^\circ} = 5.12 + j2.72.$$

Определим активную, реактивную, полную мощности, коэффициент мощности (рис. 3.11) и построим треугольник мощностей:

$P = 5.12$ Вт – активная мощность,

$Q = 2.72$ ВАр – реактивная мощность,

$S = 5.798$ ВА – полная мощность,

$\cos \varphi = \cos(28^\circ) = 0.8829$ – коэффициент мощности.

Треугольник мощности показан на рис. 3.13.

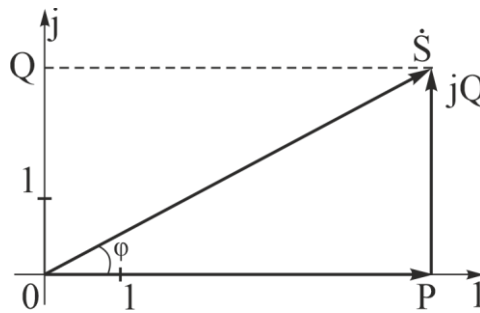


Рис. 3.13

Проверим соблюдение баланса мощности для заданной электрической схемы. В электрических цепях синусоидального тока баланс мощности можно выразить в комплексной форме – алгебраическая сумма комплексных мощностей всех источников энергии равна алгебраической сумме комплексных мощностей всех приемников энергии:

$$\sum_{m,n} \dot{E}_m \cdot \dot{I}_n^* = \sum_{k,l} \dot{U}_k \cdot \dot{I}_l^* . \quad (3.9)$$

Определим комплексную мощность для каждого элемента заданной электрической цепи:

$$\dot{S}_{R1} = \dot{U}_{34} \cdot \dot{I}_1^* = 4.3624e^{j120^\circ} \cdot 0.436e^{-j120^\circ} = 1.9e^{j0^\circ} = 1.9,$$

$$\dot{S}_{R2} = \dot{U}_{01} \cdot \dot{I}_2^* = 1.64e^{j62^\circ} \cdot 0.82e^{-j62^\circ} = 1.345e^{j0^\circ} = 1.345,$$

$$\dot{S}_{R3} = \dot{U}_{23} \cdot \dot{I}_3^* = 2.321e^{j52^\circ} \cdot 0.774e^{-j52^\circ} = 1.78e^{j0^\circ} = 1.78,$$

$$\dot{S}_{R4} = \dot{U}_{R4} \cdot \dot{I}_4^* = 0.564e^{j128^\circ} \cdot 0.141e^{-j128^\circ} = 0.08e^{j0^\circ} = 0.08,$$

$$\dot{S}_L = \dot{U}_{12} \cdot \dot{I}_5^* = 4.3624e^{j120^\circ} \cdot 0.694e^{-j30^\circ} = 3.026e^{j90^\circ} = 3.026j,$$

$$\dot{S}_C = \dot{U}_C \cdot \dot{I}_4^* = 2.24e^{j38^\circ} \cdot 0.141e^{-j128^\circ} = 0.316e^{-j90^\circ} = -0.316j.$$

Подставим полученные значения в формулу (3.9):

$$\dot{S} = \dot{S}_{R1} + \dot{S}_{R2} + \dot{S}_{R3} + \dot{S}_{R4} + \dot{S}_L + \dot{S}_C,$$

$$5.12 + j2.72 = 1.9 + 1.345 + 1.78 + 0.08 + 3.026j - 0.316j \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 5.12 + j2.72 \approx 5.11 + 2.71j.$$

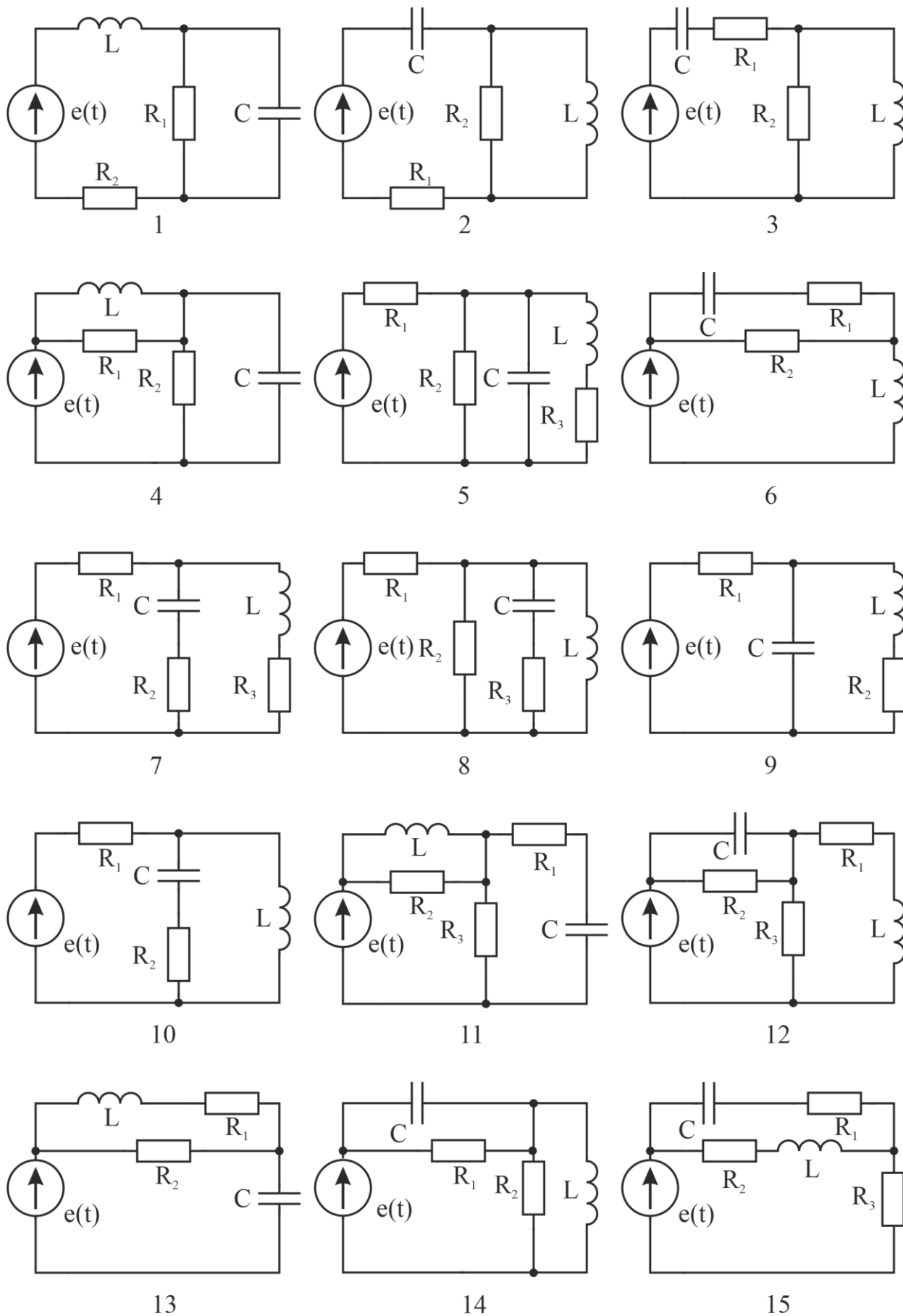
3.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА № 3. РАСЧЕТ ПРОСТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Необходимо:

- методом последовательных преобразований рассчитать цепь синусоидального тока;
- методом эквивалентного генератора рассчитать ток в одной ветви (ветвь задается преподавателем);
- построить ее векторную и топографическую диаграммы;
- построить графики мгновенных значений напряжения, тока и мощности на источнике ЭДС;
- определить активную, реактивную, полную мощности, коэффициент мощности на источнике ЭДС и построить треугольник мощностей;
- проверить соблюдение баланса мощности для заданной схемы.

Исходные данные:

- номер группы $N_{гр} = \frac{624}{abc}$, номер студента по журналу $N_{ст} = \frac{12}{km}$;
- номер схемы для расчета равен номеру студента по журналу $N_{ст}$ (рис. 3.14), если номер по списку в журнале больше 15, то номер схемы для расчета равен $N_{ст} - 15$;
- сопротивление $R1 = 10(1+k)$, [Ом];
- сопротивление $R2 = 10(1+|c-k|)$, [Ом];
- сопротивление $R3 = 10(1+|a-m|)$, [Ом];
- сопротивление $R4 = 10(2+k)$, [Ом];
- сопротивление $R5 = 10(2+|c-k|)$, [Ом];
- сопротивление $R6 = 10(2+|a-m|)$, [Ом].
- индуктивность $L = m+1$, [мГн];
- емкость $C = 10-m$, [мкФ];
- источник $e(t) = 14.14 \sin(\omega t + \varphi E^\circ)$; $\varphi E = 150 \cdot (m/2 + 1)$ ($m/2$ округляется в большую сторону);
- линейная частота $f = 1000$, [Гц].



14
Puc. 3.14

4. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

4.1. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Процессы, протекающие в электрических цепях при переходе из одного установившегося режима в другой, называются переходными. Переход от одного режима работы к другому может быть вызван изменением параметров цепи (подключением или отключением элементов электрической цепи) и называется коммутацией.

Известно, что реактивные элементы индуктивность L и емкость C способны запасать и отдавать энергию. При протекании через индуктивность L тока i в магнитном поле индуктивности запасается энергия $W_L = \frac{L \cdot i^2}{2}$, а энергия электрического поля, заряженного до напряжения и емкости C , составляет $W_C = \frac{C \cdot u^2}{2}$. Из принципа непрерывности изменения энергии вытекает непрерывность изменения во времени потокосцепления индуктивности и электрического заряда емкости, на которых основаны законы коммутации.

Первый закон коммутации: ток через индуктивность до коммутации равен току после коммутации $i(0_-) = i(0_+)$ и затем плавно изменяется.

Второй закон коммутации: напряжение на емкости до коммутации равно напряжению после коммутации $u(0_-) = u(0_+)$ и затем плавно изменяется.

Напряжение на индуктивности U_L и ток через емкость i_C могут изменяться скачкообразно, так как с ними непосредственно не связаны энергия магнитного поля индуктивности и энергия электрического поля емкости.

Задача расчета переходных процессов заключается в определении мгновенных значений токов в ветвях и напряжений на элементах электрической цепи после коммутации при $t > 0$.

При составлении уравнений по законам Ома и Кирхгофа используются соотношения, связывающие мгновенные значения напряжений на пассивных элементах R , L , C электрических цепей с мгновенными значениями токов, протекающих через них (описывающих вольт-амперные характеристики элементов):

а) сопротивление

$$u_R = R \cdot i_R \text{ — закон Ома;}$$

б) индуктивность

$$u_L = L \frac{di}{dt} \text{ — закон Фарадея;}$$

в) емкость

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt.$$

Переходный процесс возникает при коммутации (подключении или отключении) какой-либо части электрической цепи. Он обусловлен наличием в электрической цепи реактивных элементов (индуктивностей и емкостей), которые способны накапливать энергию от источников питания, а затем передавать ее в электрическую цепь.

4.2. ПОРЯДОК РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

1. Определяется независимая переменная. В соответствии с законами коммутации напряжение на емкости и ток через индуктивность не могут измениться скачком. Поэтому если электрическая цепь содержит индуктивность, в качестве независимой переменной принимается ток через индуктивность, а если емкость, то – напряжение на ней.

2. Составляется дифференциальное уравнение для переходного процесса в электрической цепи, и записывается его общее решение:

$$u_C(t) = u_{св}(t) + u_{пр} \quad \text{или} \quad i_L(t) = i_{св}(t) + i_{пр}, \quad (4.1)$$

где $u_{св}(t)$ и $i_{св}(t)$ – свободные составляющие напряжения и тока, $u_{пр}$ и $i_{пр}$ – принужденные составляющие напряжения и тока (значения в установившемся режиме).

3. Определяются начальные условия, по которым рассчитывается постоянная интегрирования в решении дифференциального уравнения. Начальными условиями являются напряжение на емкости и ток через индуктивность до коммутации. Напряжение на емкости и ток через индуктивность не могут изменяться скачкообразно, поэтому напряжение на емкости и ток через индуктивность после коммутации останутся теми же, что и до коммутации:

$$u_C(-0) = u_C(+0) = u_C(0) \quad \text{и} \quad i_L(-0) = i_L(+0) = i_L(0). \quad (4.2)$$

Моменту коммутации ключа соответствует $t = 0$. Величины $u_C(0)$ и $i_L(0)$ находятся из эквивалентной схемы электрической цепи для установившегося режима до коммутации. Для цепи постоянного тока индуктивность представляет собой короткое замыкание, а емкость – разрыв цепи. Используя правила последовательного и параллельного соединений сопротивлений и законы Ома и Кирхгофа, рассчитывают в эквивалентной схеме ток $i_L(0)$ или напряжение $u_C(0)$.

4. Записывается решение дифференциального уравнения для свободной составляющей в виде

$$u_{св}(t) = A \cdot e^{p_1 t} \quad \text{или} \quad i_{св}(t) = A \cdot e^{p_1 t}, \quad (4.3)$$

где A – постоянная интегрирования в решении дифференциального уравнения, p_1 – корень характеристического уравнения. Для составления характеристического уравнения рассчитывается комплексное входное сопротивление электрической цепи, в которой все источники энергии заменяются их внутренним сопротивлением, все разомкнутые ветви отбрасываются. Далее в одной из ветвей полученной электрической цепи делается разрыв (рекомендуется делать разрыв на месте источника ЭДС) и относительно точек разрыва вычисляется комплексное входное сопротивление. При этом учитывается, что комплексное сопротивление индуктивности $\dot{Z}_L = j\omega L$, а комплексное сопротивление емкости $\dot{Z}_C = 1/(j\omega L)$. Выражение для входного сопротивления цепи приравнивается к

нулю, а переменная $j\omega$ заменяется на оператор p . Полученное алгебраическое уравнение называется характеристическим. Находится корень характеристического уравнения p_1 и подставляется в решение дифференциального уравнения для свободной составляющей (4.3). Корень характеристического уравнения p_1 определяет постоянную времени электрической цепи

$$\tau = 1/|p_1| \text{ [с]}. \quad (4.4)$$

5. Определяется принужденная составляющая напряжения или тока в установившемся режиме при $t = \infty$. Для этого составляется эквивалентная схема электрической цепи после коммутации в установившемся режиме. Для цепи постоянного тока индуктивность заменяется коротким замыканием, а емкость – разрывом. Далее, используя правила последовательного и параллельного соединений сопротивлений, законы Ома и Кирхгофа, рассчитывают величину $u_{пр}$ или $i_{пр}$.

6. Определяется постоянная интегрирования A . Для этого записывается общее решение дифференциального уравнения в виде (4.1) с учетом найденных корней характеристического уравнения (п.4) и принужденной составляющей (п.5).

Подставив в полученное уравнение момент времени $t = 0$, получим

$$u_C(0) = A + u_{пр} \quad \text{или} \quad i_L(0) = A + i_{пр}. \quad (4.5)$$

Далее, используя начальные условия $u_C(0)$ или $i_L(0)$, найденные в п.3, определяют постоянную интегрирования A . Таким образом, получаем выражение для общего решения дифференциального уравнения переходного процесса.

7. По найденным $u_C(t)$ или $i_L(t)$ рассчитываются ток через емкость $i_C(t)$ или напряжение на индуктивности $u_L(t)$ по формулам:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad \text{или} \quad u_L = L \frac{di_L}{dt}. \quad (4.6)$$

8. Построим временные диаграммы токов и напряжений реактивного элемента на интервале времени от $t = 0$ до $t = 5\tau$, расчетные точки берем через интервал $\Delta t = 0.5\tau$. Пример временной диаграммы переходного процесса приведен на рис. 4.1.

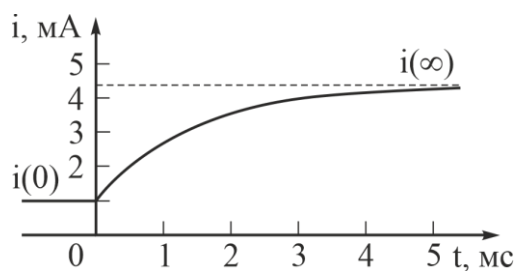


Рис. 4.1

4.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Задание. Необходимо рассчитать переходный процесс, протекающий в электрической цепи с одним реактивным элементом (рис .4.2), рассчитать напряжение на реактивном элементе и ток через него после коммутации, построить зависимости от времени напряжения и тока реактивного элемента после коммутации.

Исходные данные для расчета:

$E = 10 \text{ В}; \quad R_1 = 10 \text{ Ом}; \quad R_2 = 20 \text{ Ом};$
 $R_3 = 30 \text{ Ом}; \quad C = 10 \text{ мкФ}.$

Решение. 1. Определяем независимую переменную. Электрическая цепь содержит емкость, значит, независимая переменная — это напряжение на емкости $u_C(t)$.

2. Записываем общее решение дифференциального уравнения

$$u_C(t) = u_{св}(t) + u_{пр}.$$

3. Определяем начальные условия

$u_C(-0) = u_C(+0) = u_C(0)$. Для этого составляем эквивалентную схему электрической цепи для установившегося режима до коммутации (рис.4.3) и рассчитываем $u_C(0)$:

$$I = \frac{E}{R_1 + R_3} = \frac{10}{10 + 30} = 0.25 \text{ А},$$

$$u_C(0) = U_{R3} = I \cdot R_3 = 0.25 \cdot 30 = 7.5 \text{ В}.$$

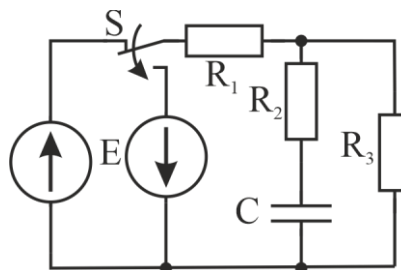


Рис. 4.2

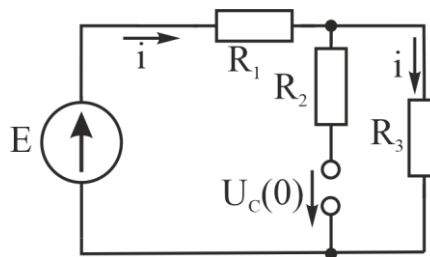


Рис. 4.3

4. Записываем решение дифференциального уравнения для свободной составляющей

$$u_{св}(t) = A \cdot e^{p_1 t},$$

где A — постоянная интегрирования в решении дифференциального уравнения (определяется из начальных условий), p_1 — корень характеристического уравнения. Определяем корень характеристического уравнения.

Для получения характеристического уравнения составляем эквивалентную схему после коммутации, где L заменяем операторным значением pL , C — $1/pC$, отбрасываем разомкнутые ветви, заменяем источники питания их внутренним сопротивлением (рис 4.4). Делаем разрыв в любой ветви (согласно рекомендациям — на месте источника ЭДС) и определяем входное сопротивление $Z(p)$:

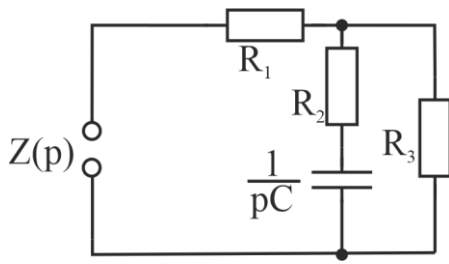


Рис. 4.4

$$Z(p) = R_1 + \frac{\left(R_2 + \frac{1}{pC}\right)R_3}{R_2 + \frac{1}{pC} + R_3}.$$

Приравниваем входное сопротивление $Z(p)$ нулю:

$$\begin{aligned} 10 + \frac{\left(20 + \frac{10^5}{p}\right)30}{20 + \frac{10^5}{p} + 30} &= 0; \\ 10 + \frac{600p + 3 \cdot 10^6}{50p + 10^5} &= 0; \\ 10 \cdot (50p + 10^5) + 600p + 3 \cdot 10^6 &= 0; \\ 500p + 10^6 + 600p + 3 \cdot 10^6 &= 0; \\ 1.1 \cdot 10^3 p + 4 \cdot 10^6 &= 0; \\ p_1 &= \frac{-4 \cdot 10^6}{1.1 \cdot 10^3}; \\ p_1 &= -3.636 \cdot 10^3. \end{aligned}$$

Записываем решение дифференциального уравнения для свободной составляющей с учетом корня характеристического уравнения:

$$u_{\text{св}}(t) = A \cdot e^{-3.636 \cdot 10^3 t}.$$

Определяем постоянную времени переходного процесса:

$$\tau = \frac{1}{|p_1|} = \frac{1}{3.636 \cdot 10^3} = 0.2750 \cdot 10^{-3} = 0.275 \text{ мс}.$$

5. Определяем принужденную составляющую $u_{\text{пр}}$. Для этого составляем эквивалентную схему электрической цепи после коммутации в установившемся режиме и рассчитываем $u_{\text{пр}}$ (рис. 4.5):

$$\begin{aligned} i &= \frac{E}{R_1 + R_3} = \frac{10}{10 + 30} = 0.25 \text{ А}; \\ u_{\text{пр}} &= -u_{R_3} = -i \cdot R_3 = -0.25 \cdot 30 = -7.5 \text{ В}. \end{aligned}$$

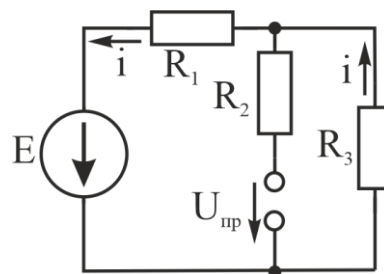


Рис. 4.5

6. Определяем постоянную интегрирования A .

Записываем общее решение дифференциального уравнения с учетом корня характеристического уравнения и принужденной составляющей:

$$u_C(t) = A \cdot e^{-3.636 \cdot 10^3 t} - 7.5.$$

Записываем в полученное уравнение для момента времени $t = 0$:

$$u_C(0) = A - 7.5.$$

Из начальных условий $u_C(0) = 7.5$.

Таким образом, получим следующее уравнение $7.5 = A - 7.5$.

Отсюда находим $A = 15$.

Записываем итоговое выражение для общего решения дифференциального уравнения:

$$u_C(t) = 15 \cdot e^{-3.636 \cdot 10^3 t} - 7.5 \text{ В}.$$

7. Рассчитываем ток через емкость $i_C(t)$:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt};$$

$$i_C(t) = 10^{-5} (-3.636 \cdot 10^3) \cdot 10 \cdot e^{-3.636 \cdot 10^3 t};$$

$$i_C(t) = -54.54 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-3.636 \cdot 10^3 t};$$

$$i_C(t) = -0.5454 \cdot e^{-3.636 \cdot 10^3 t} \text{ А}.$$

8. Построим временные диаграммы тока и напряжения на емкости:

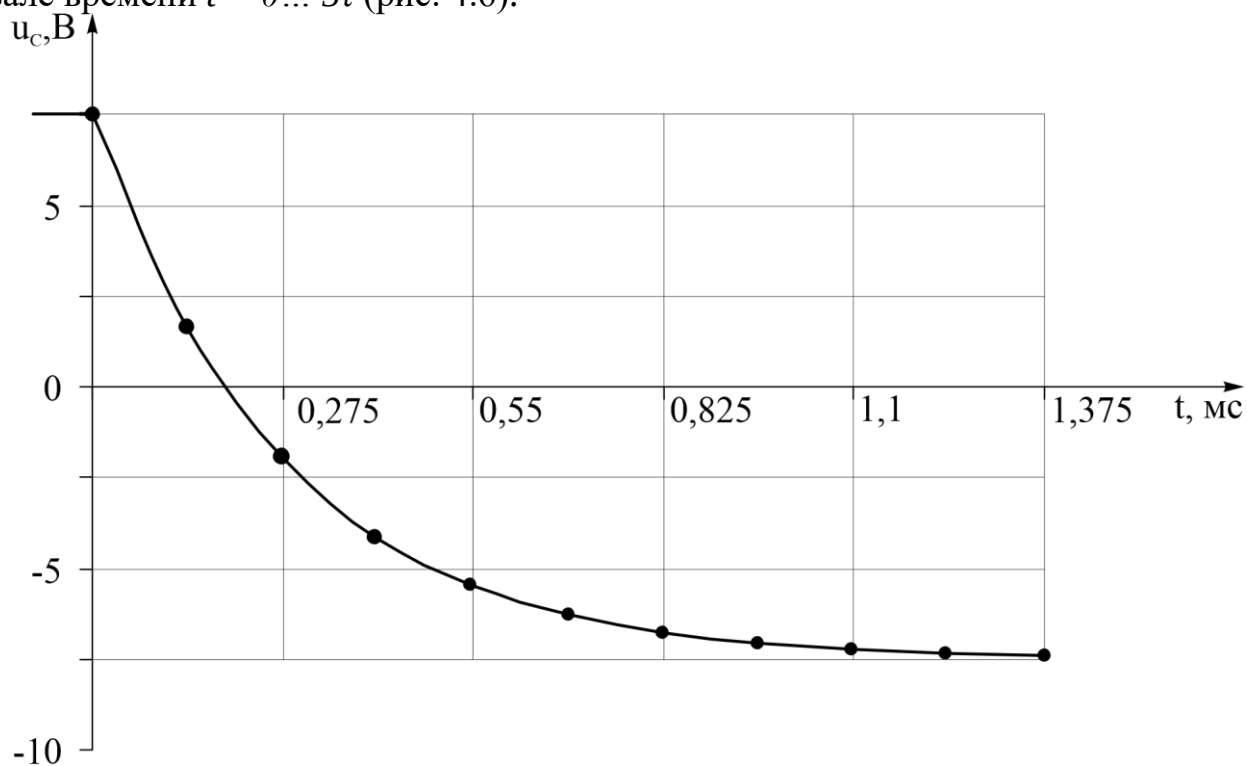
$$u_C(t) = 15 \cdot e^{-3.636 \cdot 10^3 t} - 7.5;$$

$$i_C(t) = -0.5454 \cdot e^{-3.636 \cdot 10^3 t}.$$

Для этого составим таблицу значений тока и напряжения на емкости на интервале времени от 0 до 5τ с шагом 0.5τ .

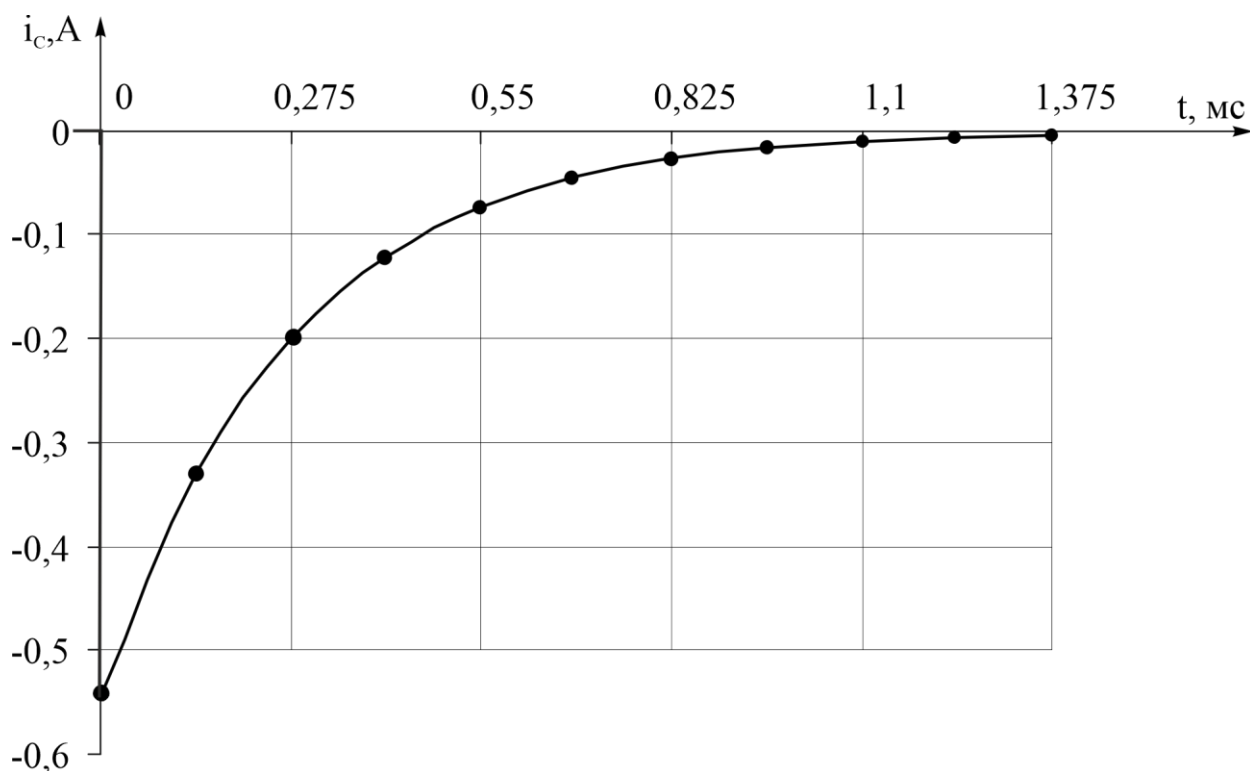
τ	$t, \text{ мс}$	$u_c, \text{ В}$	$i_c, \text{ А}$
0	0,0000	7,500	-0,5454
$0,5 \cdot \tau$	0,1375	1,598	-0,3308
$1 \cdot \tau$	0,2750	-1,982	-0,2006
$1,5 \cdot \tau$	0,4125	-4,153	-0,1217
$2 \cdot \tau$	0,5501	-5,470	-0,0738
$2,5 \cdot \tau$	0,6876	-6,269	-0,0448
$3 \cdot \tau$	0,8251	-6,753	-0,0272
$3,5 \cdot \tau$	0,9626	-7,047	-0,0165
$4 \cdot \tau$	1,1001	-7,225	-0,0100
$4,5 \cdot \tau$	1,2376	-7,333	-0,0061
$5 \cdot \tau$	1,3751	-7,399	-0,0037

По данным таблицы строим временные диаграммы $u_c(t)$ и $i_c(t)$ на интервале времени $t = 0 \dots 5\tau$ (рис. 4.6).



а

Рис. 4.6 (начало)



б

Рис. 4.6 (окончание)

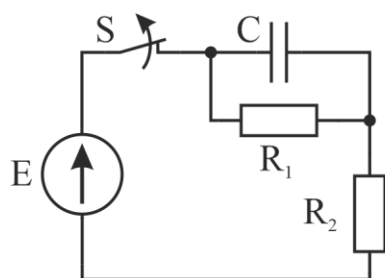
4.4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА № 4. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Необходимо:

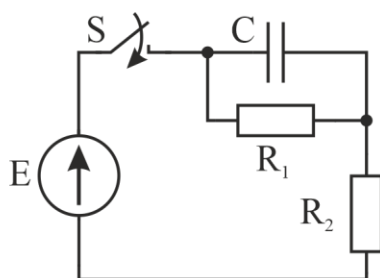
- рассчитать переходный процесс, протекающий в электрической цепи с одним реактивным элементом;
- рассчитать напряжение на реактивном элементе и ток через него после коммутации;
- построить зависимости от времени напряжения и тока реактивного элемента после коммутации.

Исходные данные:

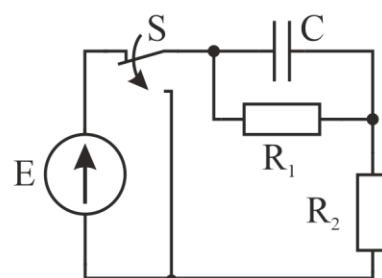
- номер группы $N_{гр} = \frac{624}{abc}$, номер студента по журналу $N_{ст} = \frac{12}{km}$;
- номер схемы для расчета равен номеру студента по журналу $N_{ст}$ (рис. 4.7);
- напряжение источника питания $E = 10(c+k+1)$, [В];
- сопротивление $R_1 = m+k$, [Ом];
- сопротивление $R_2 = m+b$, [Ом];
- сопротивление $R_3 = k+a+1$, [Ом];
- индуктивность $L = m+1$, [мГн];
- емкость $C = 10-m$, [мкФ].



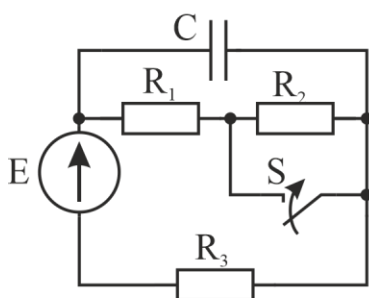
1



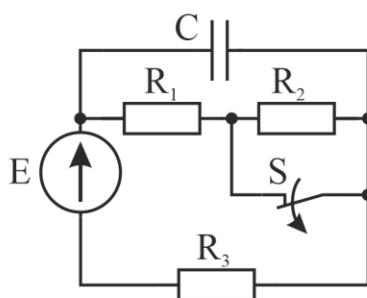
2



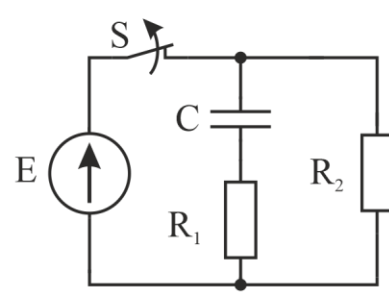
3



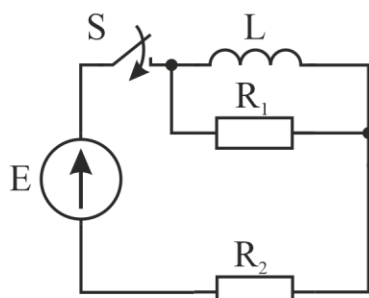
4



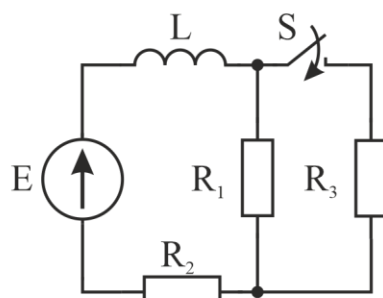
5



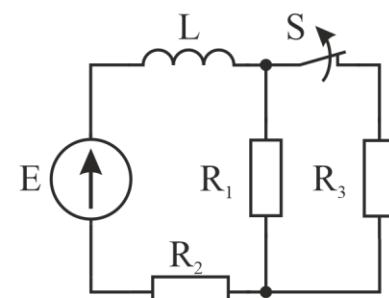
6



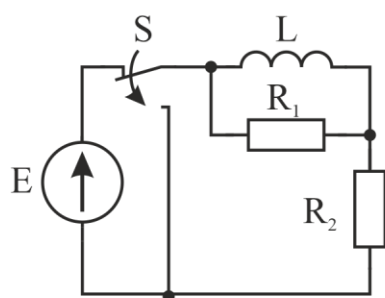
7



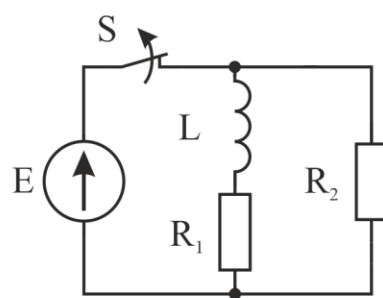
8



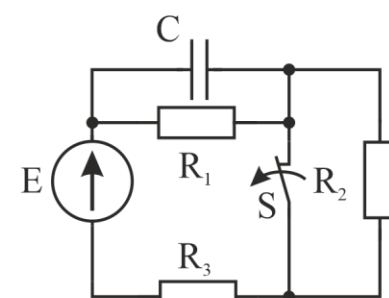
9



10



11



12

Рис. 4.7 (начало)

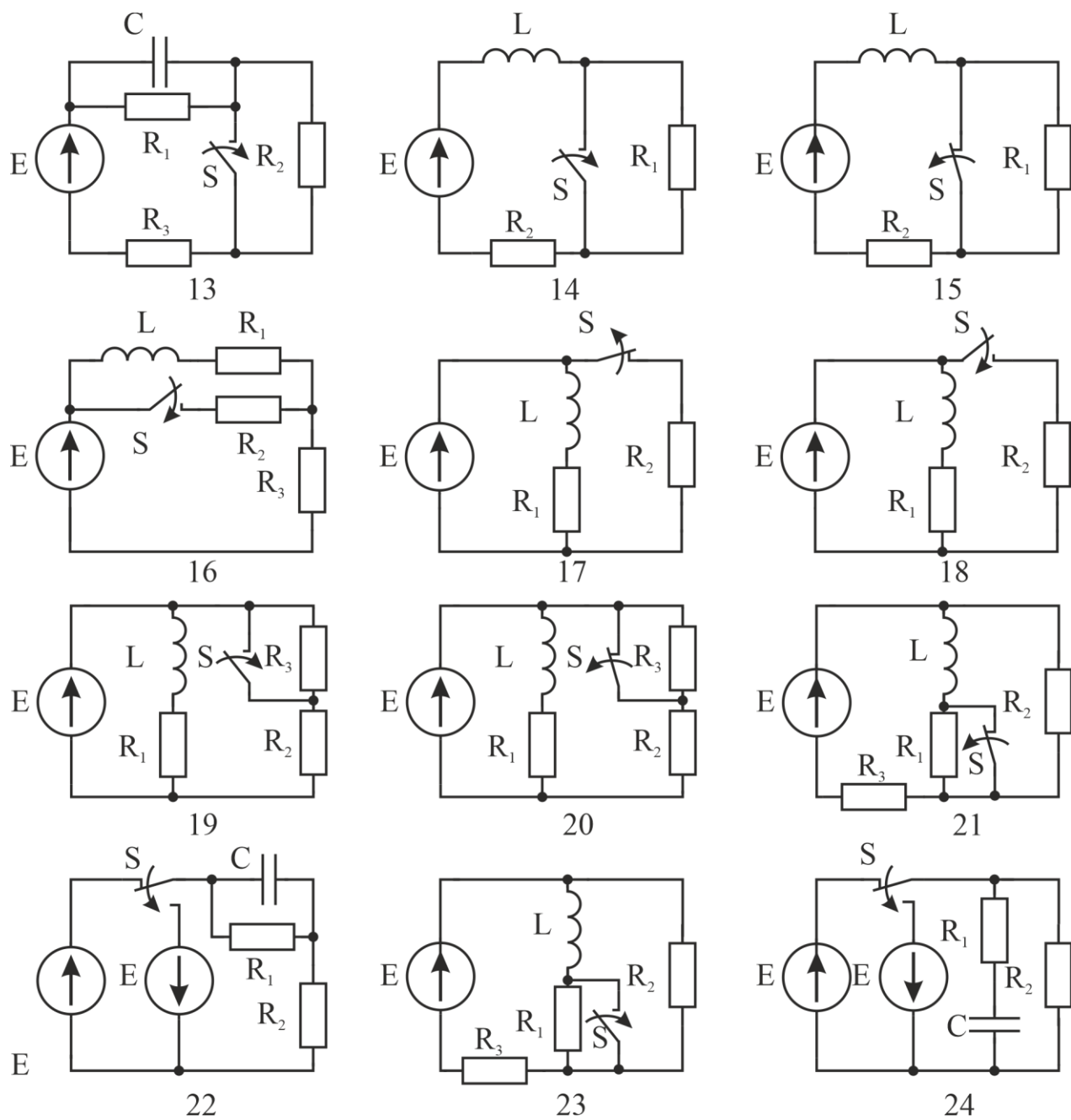


Рис. 4.7 (окончание)

5. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

5.1. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ВТОРОГО ПОРЯДКА. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрическая цепь второго порядка содержит два противоположных реактивных элемента – L и C . При последовательном соединении элементов L и C электрическую цепь называют последовательным колебательным контуром, а при параллельном соединении элементов L и C – параллельным колебательным контуром.

Характер переходного процесса в электрической цепи второго порядка зависит от добротности контура Q . При добротности $Q < 0,5$ переходный процесс носит апериодический характер, при $Q > 0,5$ – колебательный.

5.2. ПОРЯДОК РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

1. Определяется независимая переменная. В соответствии с законами коммутации напряжение на емкости и ток через индуктивность не могут измениться скачком. В качестве независимой переменной в последовательном контуре выбирается напряжение на емкости $u_C(t)$, а в параллельном контуре – ток через индуктивность $i_L(t)$.

2. Составляется дифференциальное уравнение для переходного процесса в электрической цепи и записывается его общее решение:

$$u_C(t) = u_{св}(t) + u_{пр} \quad \text{или} \quad i_L(t) = i_{св}(t) + i_{пр}, \quad (5.1)$$

где $u_{св}(t)$ и $i_{св}(t)$ – свободные составляющие напряжения и тока, $u_{пр}$ и $i_{пр}$ – принужденные составляющие напряжения и тока (значения в установившемся режиме).

3. Определяются начальные условия. Начальными условиями являются напряжение на емкости и ток через индуктивность до коммутации. Моменту коммутации ключа соответствует $t = 0$. Величины $u_C(0)$ и $i_L(0)$ находятся из эквивалентной схемы электрической цепи для установившегося режима до коммутации. Для цепи постоянного тока индуктивность представляет собой короткое замыкание, а емкость – разрыв цепи. Используя правила последовательного и параллельного соединений сопротивлений и законы Ома и Кирхгофа, рассчитываем ток $i_L(0)$ и напряжение $u_C(0)$.

4. Записывается решение дифференциального уравнения для свободной составляющей в виде

$$u_{св}(t) = A \cdot e^{\alpha t} \cdot \sin(\omega_c t + \theta) \quad \text{или} \quad i_{св}(t) = A \cdot e^{\alpha t} \cdot \sin(\omega_c t + \theta), \quad (5.2)$$

где A и θ – постоянные интегрирования в решении дифференциального уравнения, α и ω_c – действительная и мнимая части корней характеристического уравнения. Для составления характеристического уравнения рассчитывается комплексное входное сопротивление электрической цепи, в которой все источники энергии заменяются их внутренним сопротивлением, все разомкнутые ветви отбрасываются. Далее в одной из ветвей полученной электрической цепи

делается разрыв (рекомендуется делать разрыв на месте источника ЭДС) и относительно точек разрыва вычисляется комплексное входное сопротивление. При этом учитывается, что комплексное сопротивление индуктивности $\dot{Z}_L = j\omega L$, а комплексное сопротивление емкости $\dot{Z}_C = 1/(j\omega C)$. Выражение для входного сопротивления цепи приравнивается к нулю, а переменная $j\omega$ заменяется на оператор p . Полученное алгебраическое уравнение называется характеристическим. Находятся корни характеристического уравнения $p_{1,2} = \alpha \pm j\omega_c$ и подставляются в решение дифференциального уравнения для свободной составляющей (5.2). Действительная часть корней характеристического уравнения α определяет постоянную времени затухания колебаний контура

$$\tau = \frac{1}{|\alpha|},$$

а мнимая часть корней характеристического уравнения – период этих колебаний $T = 2\pi / \omega_c$.

5. Определяются принужденные составляющие напряжения на емкости и тока через индуктивность в установившемся режиме при $t = \infty$. Для этого составляем эквивалентную схему электрической цепи для установившегося режима после коммутации. Для цепи постоянного тока индуктивность заменяется коротким замыканием, а емкость – разрывом цепи. Далее, используя правила последовательного и параллельного соединений сопротивлений, законы Ома и Кирхгофа, рассчитывают величину $u_{пр}$ и $i_{пр}$.

6. Определяются постоянные интегрирования A и θ . Для этого записывается общее решение дифференциального уравнения в виде (5.3) с учетом найденных корней характеристического уравнения (п.4) и принужденных составляющих (п.5). Находят выражения для тока через емкость или напряжения на индуктивности по формулам:

$$u_C(t) \rightarrow i_C(t) = C \frac{du_C}{dt} \text{ или } i_L(t) \rightarrow u_L(t) = L \frac{di_L}{dt}. \quad (5.3)$$

Подставляя в выражения для тока и напряжения значение $t = 0$ и используя начальные условия $u_C(0)$ и $i_L(0)$, найденные в п.3, составляют систему из двух алгебраических уравнений, из решения которой определяют постоянные интегрирования A и θ . Записывается итоговое выражение для общего решения дифференциального уравнения переходного процесса.

7. Строятся временные диаграммы тока через индуктивность и напряжения на емкости на интервале времени от $t = 0$ до $t = 3\tau$, используя следующие правила (рис. 5.1):

1) построить затухающую экспоненту $x(t) = Ae^{\alpha t}$ и симметричную ей относительно оси времени экспоненту $x(t) = -Ae^{\alpha t}$. Эти кривые являются огибающими колебательного процесса изменения во времени напряжения или тока;

2) рассчитать период колебаний и отложить на оси времени характерные точки ($T/4$, $T/2$, $3T/4$, T и т. д.) экстремумы и точки пересечения с осью времени t ;

3) используя значения гармонического колебания в характерных точках и экспоненциальную огибающую, построить временные диаграммы изменения токов и напряжений во время переходного процесса.

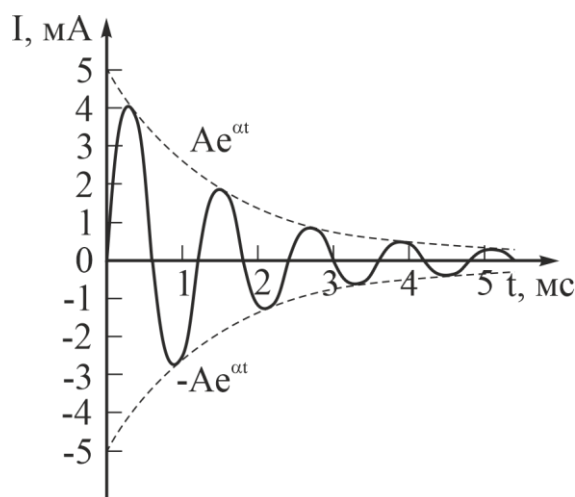


Рис. 5.1

5.3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Задание. Необходимо рассчитать переходный процесс, протекающий в электрической цепи с двумя реактивными элементами (рис. 5.2), рассчитать напряжение на емкости и ток через индуктивность после коммутации, построить временные диаграммы тока через индуктивность и напряжения на емкости после коммутации.

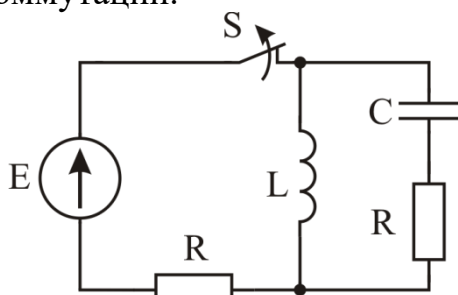


Рис. 5.2

Исходные данные для расчета:

$$E = 10 \text{ В}; L = 1 \text{ мГн}; C = 10 \text{ мкФ};$$

$$R = \rho / 5;$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{10^{-3}}{10^{-5}}} = 10 \text{ Ом};$$

$$R = 10 / 5 = 2 \text{ Ом}.$$

Решение.

1. Определяем независимую переменную. В качестве независимой переменной в последовательном контуре выбирается напряжение на емкости $u_C(t)$.

2. Записываем общее решение дифференциального уравнения

$$u_C(t) = u_{св}(t) + u_{пр}.$$

3. Определяем начальные условия $u_C(0)$ и $i_L(0)$. Для этого составляем эквивалентную схему электрической цепи до коммутации в установившемся режиме (рис. 5.3) и рассчитываем $u_C(0)$ и $i_L(0)$:

$$i_L(0) = \frac{E}{R} = \frac{10}{2} = 5 \text{ А},$$

$$u_C(0) = 0 \text{ В}.$$

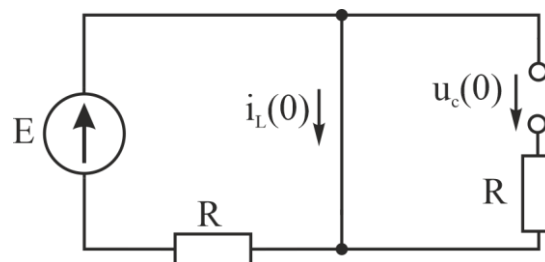


Рис. 5.3

4. Записываем решение дифференциального уравнения для свободной составляющей

$$u_{\text{св}}(t) = A \cdot e^{\alpha t} \cdot \sin(\omega_c t + \theta),$$

где A и θ – постоянные интегрирования в решении дифференциального уравнения (определяются из начальных условий), α и ω_c – действительная и мнимая части корней характеристического уравнения ($p_{1,2} = \alpha \pm j\omega_c$).

Для характеристического уравнения составляем схему после коммутации, отбрасываем разомкнутые ветви, заменяем источники питания их внутренним сопротивлением, делаем разрыв в любой ветви (согласно рекомендациям – в месте источника ЭДС) (рис. 5.4) и вычисляем входное сопротивление $Z(p)$:

$$Z(p) = pL + \frac{1}{pC} + R.$$

Приравниваем $Z(p)=0$:

$$p \cdot 10^{-3} + \frac{10^5}{p} + 2 = 0.$$

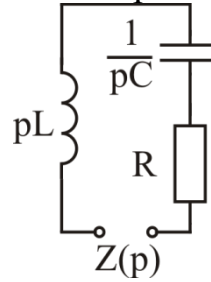


Рис. 5.4

Умножаем левую и правую части уравнения на p , $p \neq 0$:

$$p^2 \cdot 10^{-3} + 10^5 + 2p = 0, \quad p^2 + 2 \cdot 10^3 p + 10^8 = 0.$$

Решаем полученное квадратное уравнение:

$$D = b^2 - 4ac = 4 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^8 = -3.96 \cdot 10^8,$$

$$p_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}, \quad p_{1,2} = -10^3 \pm j \cdot 9.95 \cdot 10^3,$$

$\alpha = -10^3$ – коэффициент затухания колебаний контура,

$\omega_c = 9.95 \cdot 10^3$ – частота собственных колебаний контура.

Записываем решение дифференциального уравнения для свободной составляющей:

$$u_{\text{св}}(t) = A \cdot e^{-10^3 t} \cdot \sin(9.95 \cdot 10^3 t + \theta).$$

Определяем постоянную времени затухания колебаний контура τ :

$$\tau = \frac{1}{|\alpha|} = 10^{-3} = 1 \text{ мс}.$$

Определяем период затухающих колебаний контура T :

$$T = \frac{2\pi}{\omega_c} = \frac{6.28}{9.95 \cdot 10^3} = 6.312 \cdot 10^{-4} = 0.6312 \text{ мс}.$$

5. Определяем принужденную составляющую напряжения на емкости $u_{\text{пр}}$. Для этого составляем эквивалентную схему электрической цепи после коммутации в установившемся режиме (рис. 5.5) и определяем $u_{\text{пр}}$.

$$u_{\text{пр}} = 0 \text{ В}$$

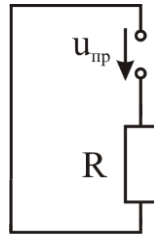


Рис. 5.5

6. Определяем постоянные интегрирования A и θ . Используя найденное выражение для напряжения на емкости $u_C(t)$

$$u_C(t) = A \cdot e^{-10^3 t} \cdot \sin(9.95 \cdot 10^3 t + \theta),$$

определяем ток через емкость, используя формулу

$$i_C(t) = C \frac{du_C}{dt},$$

$$i_C(t) = 10^{-5} \cdot (-10^{-3} A \cdot e^{-10^3 t} \cdot \sin(9.95 \cdot 10^3 t + \theta) + 9.95 \cdot 10^3 A \cdot e^{-10^3 t} \cdot \cos(9.95 \cdot 10^3 t + \theta)).$$

Таким образом, учитывая, что $i_C(t) = i_L(t)$ в схеме после коммутации, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} u_C(t) = A \cdot e^{-10^3 t} \cdot \sin(9.95 \cdot 10^3 t + \theta), \\ i_L(t) = -10^{-8} A \cdot e^{-10^3 t} \cdot \sin(9.95 \cdot 10^3 t + \theta) + 9.95 \cdot 10^{-2} A \cdot e^{-10^3 t} \cdot \cos(9.95 \cdot 10^3 t + \theta). \end{cases} \quad \text{За}$$

писываем выражения $u_C(t)$ и $i_L(t)$ для момента коммутации $t = 0$ и используем начальные условия, найденные в п. 3:

$$\begin{cases} u_C(0) = A \cdot \sin(\theta), \\ i_L(0) = -10^{-8} A \cdot \sin(\theta) + 9.95 \cdot 10^{-2} A \cdot \cos(\theta). \end{cases}$$

С учетом начальных условий

$$\begin{cases} u_C(0) = 0, \\ i_L(0) = 5, \end{cases}$$

найденных в п.3, составляем систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = A \cdot \sin(\theta), \\ 5 = -10^{-8} A \cdot \sin(\theta) + 9.95 \cdot 10^{-2} A \cdot \cos(\theta). \end{cases}$$

Решая систему уравнений, определяем постоянные интегрирования A и θ :

$$\begin{cases} \sin(\theta) = 0 \Leftrightarrow \theta = 0, \\ -10^{-8} A \cdot \sin(0) + 9.95 \cdot 10^{-2} A \cdot \cos(0) = 5 \Leftrightarrow 9.95 \cdot 10^{-2} A = 5, \\ \theta = 0, \\ A = 50.25. \end{cases}$$

Записываем итоговое выражение для общего решения дифференциального уравнения:

$$u_C(t) = 50.25 e^{-10^3 t} \cdot \sin(9.95 \cdot 10^3 t).$$

Записываем выражение для тока через индуктивность:

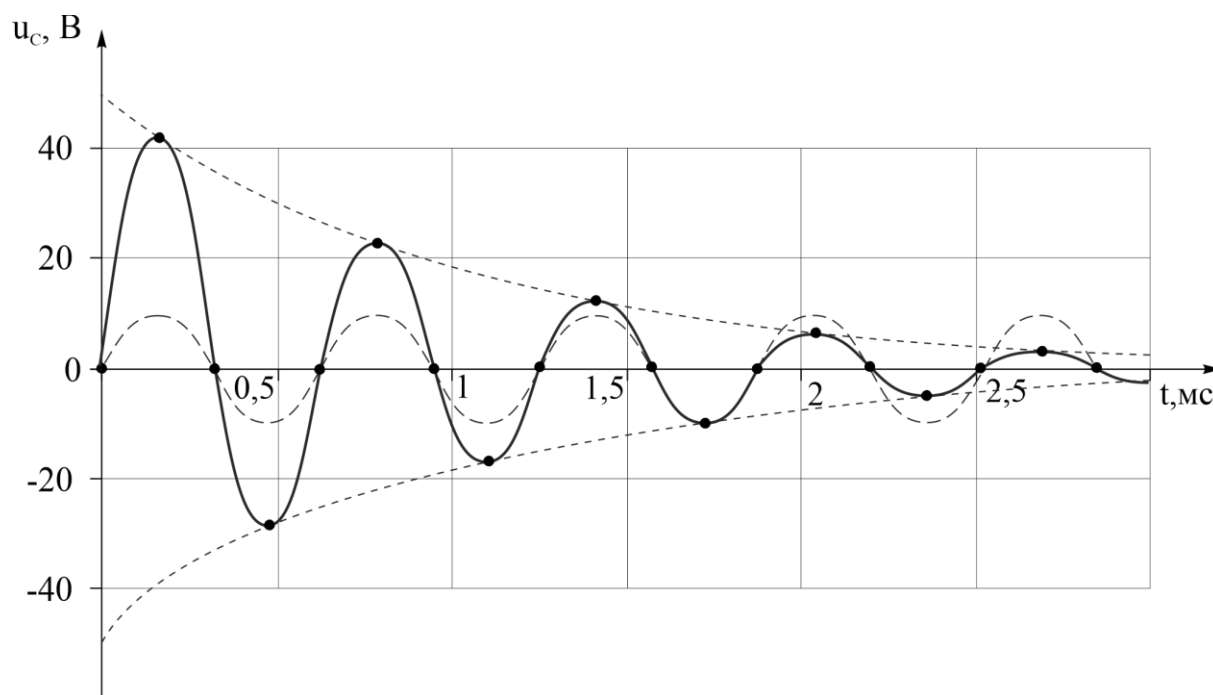
$$i_L(t) = -5.025 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-10^3 t} \cdot \sin(9.95 \cdot 10^3 t) + 5 \cdot e^{-10^3 t} \cdot \cos(9.95 \cdot 10^3 t).$$

7. Составляем таблицу значений и строим временные диаграммы $u_C(t)$ (рис. 5.6, а) и $i_L(t)$ (рис. 5.6, б) на интервале времени от $t = 0$ до $t = 3\tau$.

T	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
t, мс	0	0,1578	0,3156	0,4734	0,6312	0,7889	0,9467
u_C , В	0	42.92	0,058	-31.3	-0,085	22.8	0,093
i_L , А	5	0.0034	-3,6474	-0.0074	2,6607	0,0090	-1,9409

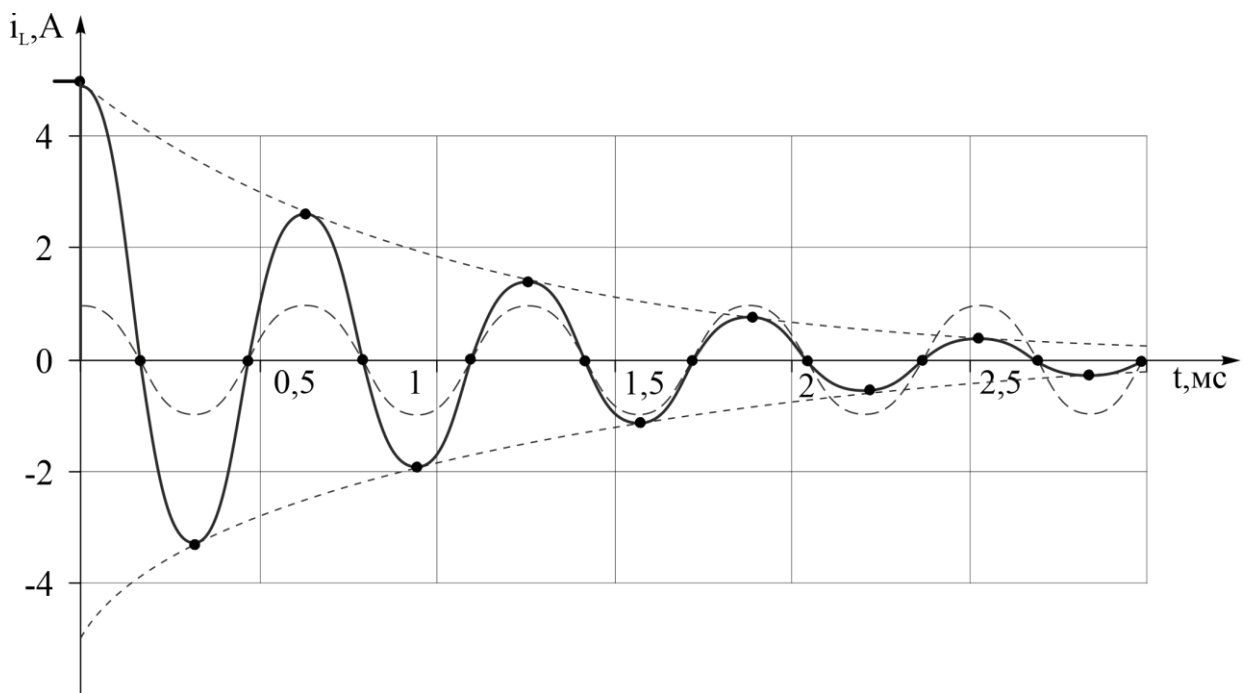
T	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25
t, мс	1,1045	1,2623	1,4201	1,5779	1,7357	1,8935	2,0513
u_C , В	-16.7	-0,091	12.15	0,083	-8.9	-0,072	6.5
i_L , А	-0.0092	1,4159	0.0087	-1,0328	-0.0077	0,7534	0.0067

T	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,75
t, мс	2,209	2,3668	2,5246	2,6824	2,8402	2,998
u_C , В	0.062	-4.7	-0,051	3.4	0.042	-2.5
i_L , А	-0,5496	-0.0056	0,4009	0.0046	-0,2925	-0.0038



а

Рис. 5.6 (начало)



б

Рис. 5.6 (окончание)

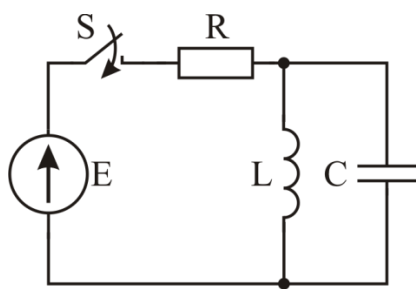
5.4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА № 5. РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Необходимо

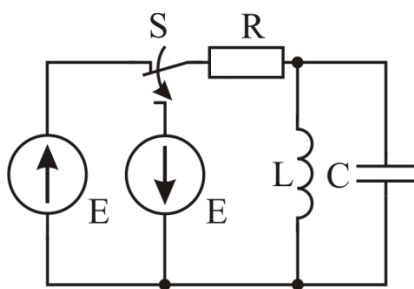
- рассчитать переходный процесс, протекающий в электрической цепи с двумя реактивными элементами (рис. 5.7);
- рассчитать напряжение на емкости и ток через индуктивность после коммутации;
- построить временные диаграммы тока через индуктивность и напряжения на емкости после коммутации.

Исходные данные:

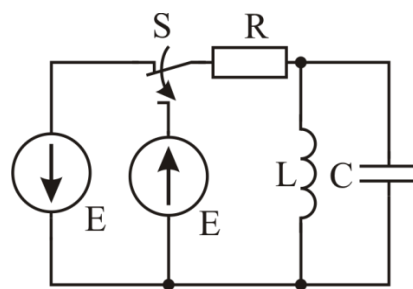
- номер группы $N_{\text{гр}} = \frac{624}{abc}$, номер студента по журналу $N_{\text{ст}} = \frac{12}{km}$;
- номер схемы для расчета равен номеру студента по журналу $N_{\text{ст}}$;
- напряжение источника питания $E = 10(c+k+1)$, [В];
- индуктивность $L = m+1$, [мГн];
- емкость $C = 10+k-m$, [мкФ];
- для схем № 1...10 задается добротность $Q = 3+k$, исходя из добротности и характеристического сопротивления $\rho = \left(\sqrt{\frac{L}{C}} \right)$ рассчитывается сопротивление $R = Q \cdot \rho$;
- для схем № 11...24 сопротивление R определяется по формуле $R = \rho / (3 + k)$.



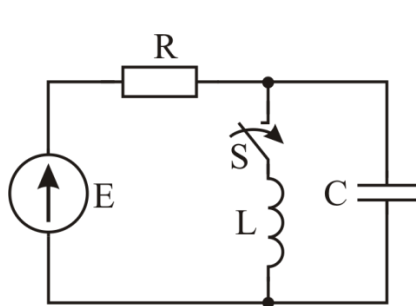
1



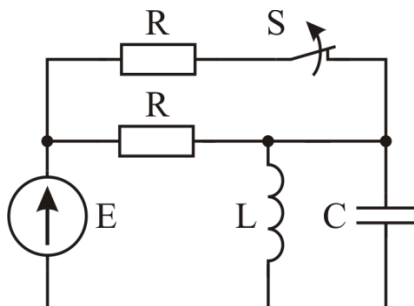
2



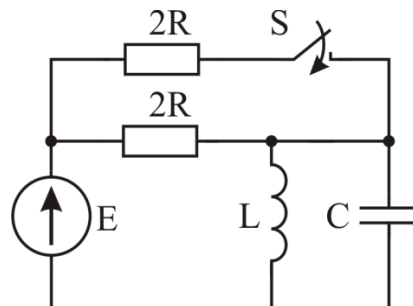
3



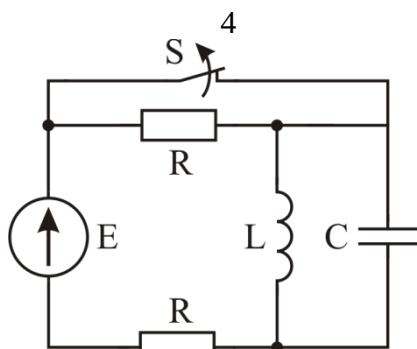
4



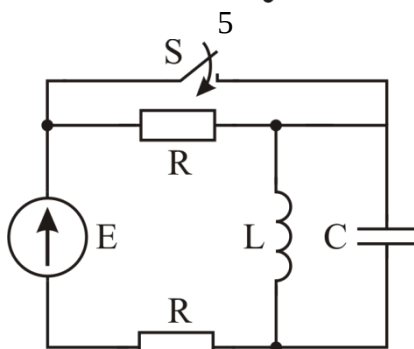
5



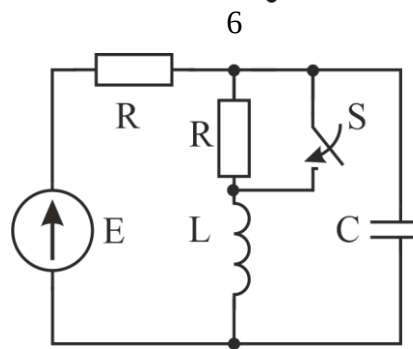
6



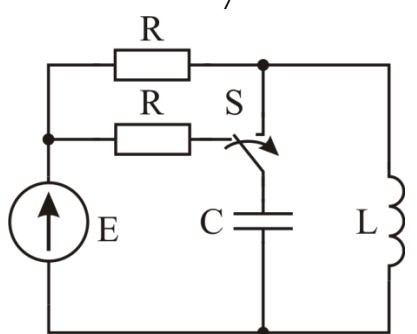
7



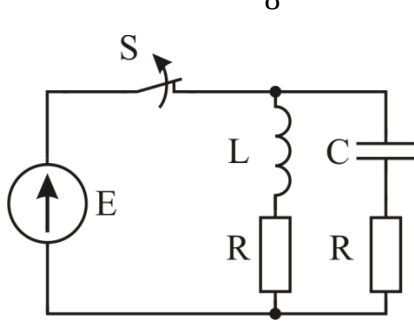
8



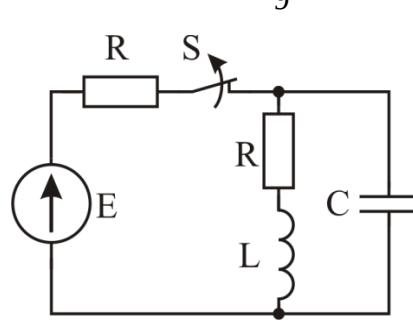
9



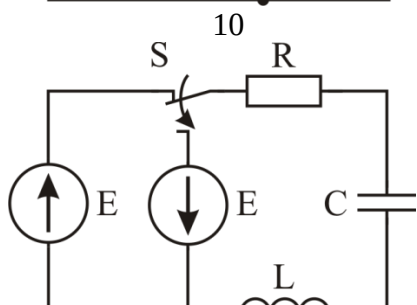
10



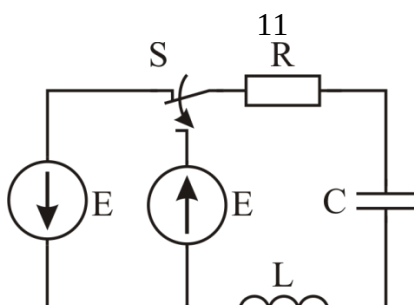
11



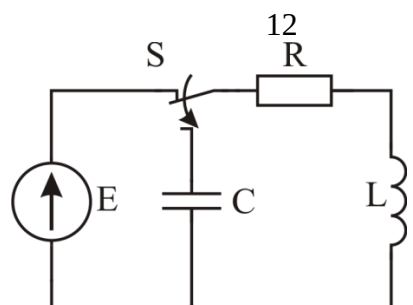
12



13



14



15

Рис. 5.7 (начало)

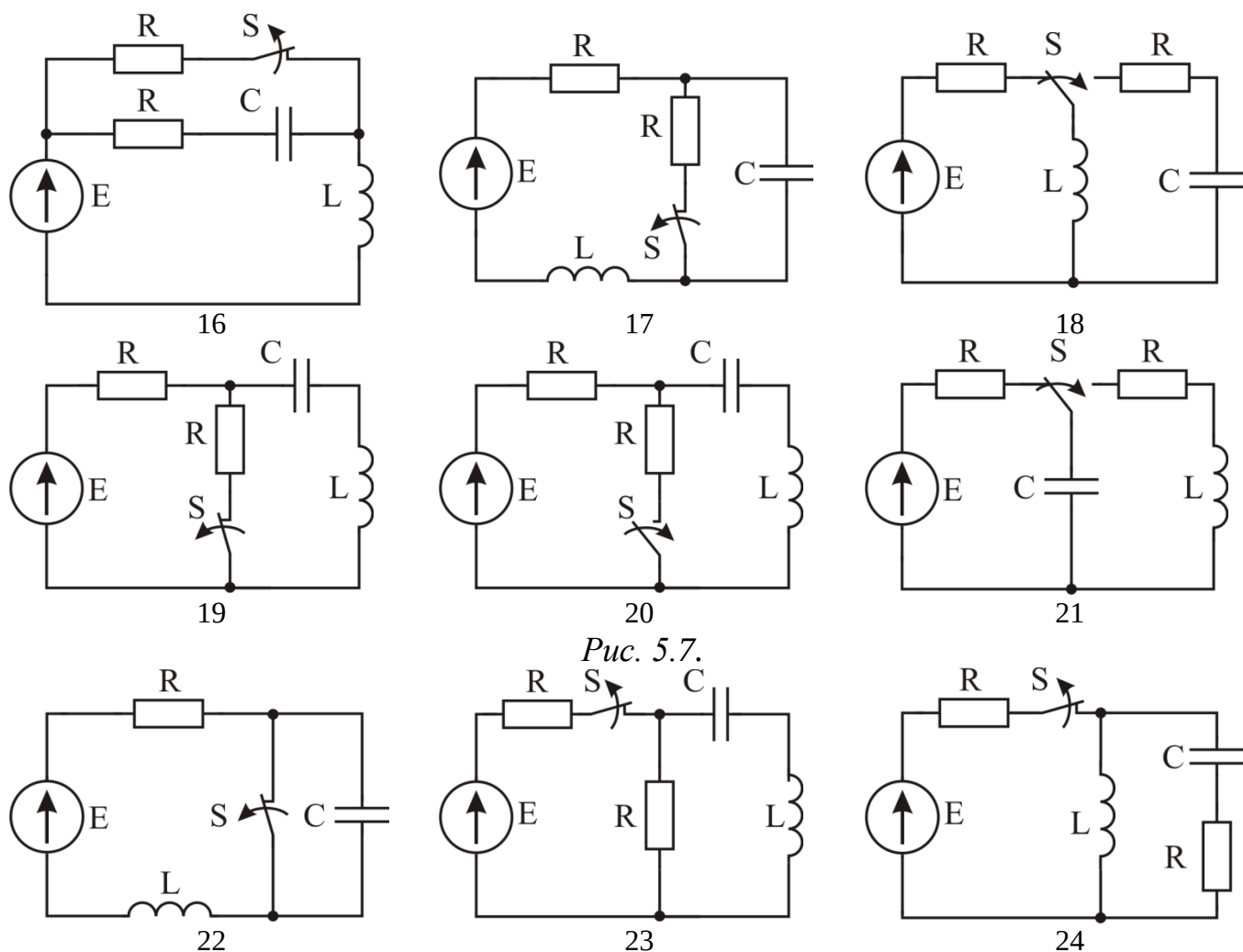


Рис. 5.7.

Рис. 5.7 (окончание)

6. РАСЧЕТ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

6.1. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Трехфазной цепью называется совокупность трехфазной системы ЭДС, трехфазной нагрузки и соединительных проводов. Трехфазная цепь является частным случаем многофазных электрических систем, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на определенный угол. Трехфазная симметричная система ЭДС – это совокупность трех синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на 120° относительно друг друга. ЭДС в симметричной трехфазной системе формируется с помощью генератора, на статоре которого размещается обмотка, состоящая из трех частей (фаз). Начала обмоток трехфазного генератора обозначают первыми буквами латинского алфавита (А, В, С), а их концы – последними (Х, Y, Z). При вращении ротора с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуцируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся друг от друга по фазе на 120° вследствие их пространственного смещения. В электротехнике ЭДС каждой фазы принято обозначать по началу обмоток А, В и С. Если ЭДС одной фазы (обычно фазы

А) принять за исходную и считать её начальной фазу равной нулю, то выражения мгновенных значений ЭДС всех трех фаз можно записать в виде

$$e_A(t) = E_m \cdot \sin \omega t ,$$

$$e_B(t) = E_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) ,$$

$$e_C(t) = E_m \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) .$$

Временные диаграммы трехфазной симметричной системы ЭДС приведены на рис. 6.1. Здесь $T=2\pi/\omega$. Для удобства построения векторно-топографических диаграмм трехфазных цепей ось действительных чисел на комплексной плоскости направляют не слева направо, а снизу вверх. Ось мнимых чисел направляют не снизу вверх, а справа налево. Представление симметричной системы ЭДС на комплексной плоскости показано на рис. 6.2.

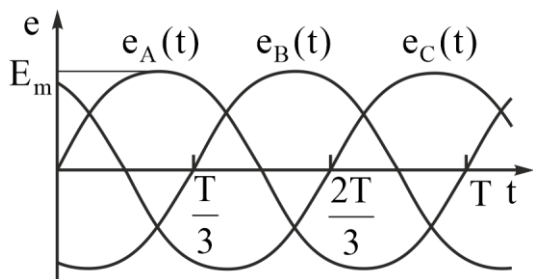


Рис. 6.1

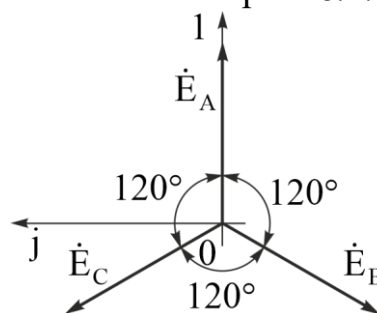


Рис. 6.2

Для трехфазной симметричной системы ЭДС в любой момент времени выполняется соотношение

$$e_A(t) + e_B(t) + e_C(t) = 0 .$$

Трехфазную систему ЭДС, в которой ЭДС фазы В отстает от ЭДС фазы А на 120° и ЭДС фазы С отстает от ЭДС фазы В на 120° , называют системой прямой последовательности фаз (рис. 6. 2). Если изменить направление вращения ротора генератора, то ЭДС фазы С будет отставать от ЭДС фазы А на 120° и ЭДС фазы В будет отставать от ЭДС фазы С на 120° . Такая последовательность

фаз будет называться обратной (рис. 6.3). Последовательность фаз определяет направление вращения трехфазных двигателей. Для определения последовательности фаз имеются специальные приборы – фазоуказатели.

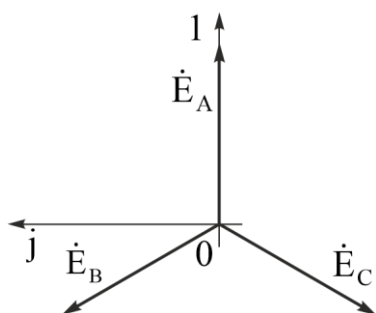


Рис. 6.3

Симметричная трехфазная система ЭДС является уравновешенной. Это означает, что даже если в отдельных фазах мгновенная мощность пульсирует (рис. 6.4,а), изменяя за время одного периода не только

величину, но и знак, суммарная мгновенная мощность всех фаз остается величиной постоянной в течение всего периода синусоидальной ЭДС (рис. 6.4,б).

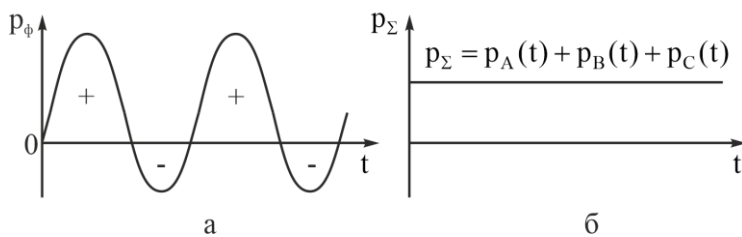


Рис. 6.4

При использовании не-связанной системы ЭДС, в которой фазы обмотки генератора электрически не соединены между собой, и каждая фаза соединяется со своим приемником двумя проводами, для соединения генератора с приемником требуется

шесть проводов. Такие системы неэкономичны. Более совершенными и экономичными являются связанные цепи, в которых фазы обмотки электрически соединены между собой. Существуют различные способы соединения фаз трехфазных источников питания и трехфазных потребителей электроэнергии. Наиболее распространенными являются соединения «звезда» и «треугольник». При этом способы соединения фаз источников и фаз потребителей в трехфазных системах могут быть различными. Фазы источника обычно соединены «звездой», фазы потребителей соединяются либо «звездой», либо «треугольником».

6.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

$$N_{\text{лр}} = \frac{623}{\text{abc}}, \quad N_{\text{ср}} = \frac{16}{\text{km}} \Rightarrow a = 6; b = 2; c = 3; k = 1; m = 6.$$

$$R_a = b + k = 2 + 1 = 3 \text{ Ом.}$$

$$R_b = a + b + c - m = 6 + 2 + 3 - 6 = 5 \text{ Ом.}$$

$$R_c = c + k = 3 + 1 = 4 \text{ Ом.}$$

$$X_a = j(m - b + k) = j(6 - 2 + 1) = j5 \text{ Ом.}$$

$$X_c = j((-1)^{b+m}(b + c - k)) = j((-1)^{2+6}(2 + 3 - 1)) = j4 \text{ Ом.}$$

$$X_b = j((-1)^{k+m}(a + k - c)) = j((-1)^{1+6}(6 + 1 - 3)) = -j4 \text{ Ом.}$$

$$\dot{U}_A = 220e^{j0^\circ} = 220; \quad \dot{U}_B = 220e^{-j120^\circ}; \quad \dot{U}_C = 220e^{j120^\circ}.$$

1. Расчет четырехпроводной трехфазной цепи соединением «звезда»-«звезда» (рис 6.5).

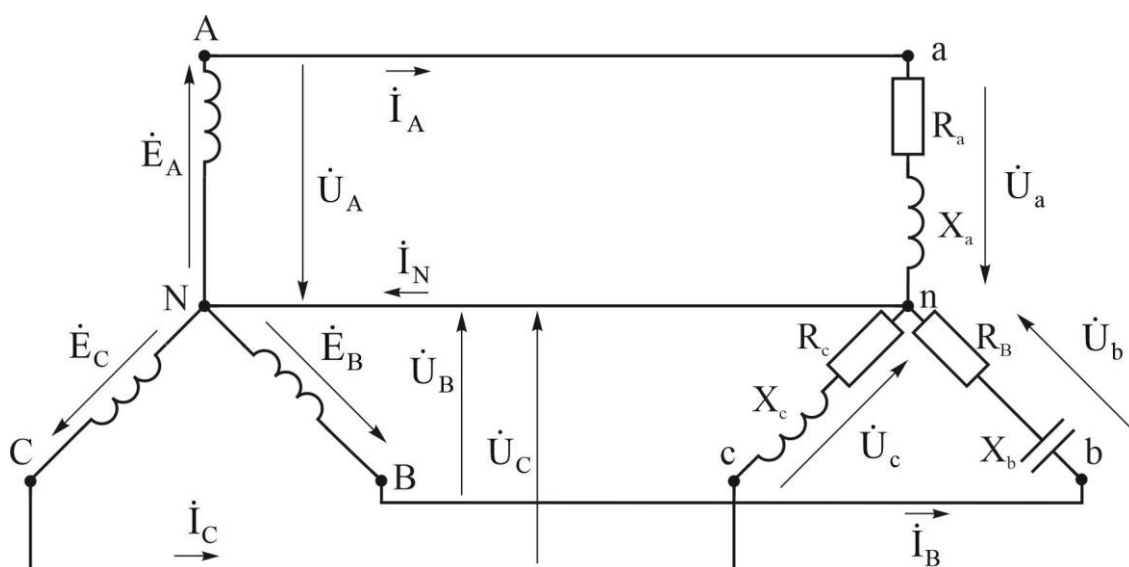


Рис. 6.5

Определим комплексные сопротивления в каждой фазе:

$$\dot{Z}_a = R_a + jX_a = 3 + j5 = \sqrt{3^2 + 5^2} e^{j \arctg(\frac{5}{3})} = 5.8 e^{j59^\circ},$$

$$\dot{Z}_b = R_b + jX_b = 5 - j4 = 6.4 e^{-j39^\circ},$$

$$\dot{Z}_c = R_c + jX_c = 4 + j4 = 5.7 e^{j45^\circ}.$$

Определим фазные токи a, b, c, учитывая $\dot{U}_a = \dot{U}_A$, $\dot{U}_b = \dot{U}_B$, $\dot{U}_c = \dot{U}_C$:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_a} = \frac{220 e^{j0^\circ}}{5.8 e^{j59^\circ}} = 37.9 e^{-j59^\circ},$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_b} = \frac{220 e^{-j120^\circ}}{6.4 e^{-j39^\circ}} = 34.37 e^{-j81^\circ},$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_c} = \frac{220 e^{j120^\circ}}{5.7 e^{j45^\circ}} = 38.9 e^{j75^\circ}.$$

Определим ток нейтрального провода:

$$\begin{aligned} I_N = I_A + I_B + I_C &= 37.9 e^{-j59^\circ} + 34.37 e^{-j81^\circ} + 38.9 e^{j75^\circ} = 19.5 - j32.5 + 5.4 - j34 + 10.1 + j37.6 = \\ &= 35 - j28.9 = 45.4 e^{-j40^\circ}. \end{aligned}$$

Построим векторную диаграмму токов (рис.6.6) и проверим соблюдение I закона Кирхгофа $I_A + I_B + I_C - I_N = 0$.

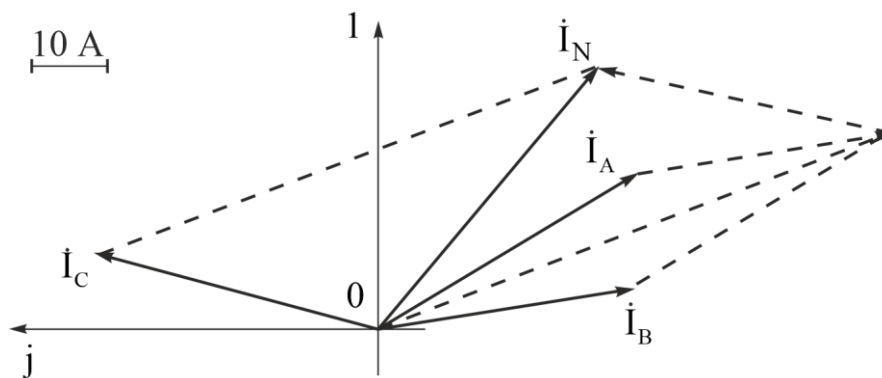


Рис. 6.6

Определим мощности каждой фазы:

комплексная мощность:

$$\dot{S}_a = U_A I_A e^{j\varphi_{Z_a}} = 220 \cdot 37.9 e^{j59^\circ} = 8338 e^{j59^\circ} = 4294 + j7147,$$

полная мощность $S_a = 8,34$ кВА; активная мощность $P_a = 4,3$ кВт; реактивная мощность $Q_a = 7,15$ кВАр;

комплексная мощность:

$$\dot{S}_b = U_B I_B e^{j\varphi_{Z_b}} = 220 \cdot 34.37 e^{-j39^\circ} = 7561 e^{-j39^\circ} = 5876 - j4758;$$

полная мощность $S_b = 7,6$ кВА; активная мощность $P_b = 5,9$ кВт; реактивная мощность $Q_b = -4,8$ кВАр;

комплексная мощность:

$$\dot{S}_c = U_C I_C e^{j\varphi_{Z_c}} = 220 \cdot 38.9 e^{j45^\circ} = 8558 e^{j45^\circ} = 6051 + j6051;$$

полная мощность $S_c = 8,56$ кВА; активная мощность $P_c = 6,1$ кВт; реактивная мощность $Q_c = 6,1$ кВАр.

Определим мощности трехфазной цепи в целом.

$$\dot{S} = \dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c = (P_a + P_b + P_c) + j(Q_a + Q_b + Q_c) = 16.3 \cdot 10^3 + j8.5 \cdot 10^3 = 18,4 \cdot 10^3 e^{j28^\circ}.$$

$$\dot{S}_A = \dot{U}_A \cdot \dot{I}_A^* = 220 \cdot 37.9 e^{j59^\circ} = 8338 e^{j59^\circ} = U_A \cdot I_A \cdot e^{j\varphi_{Z_a}}.$$

$$\dot{S}_B = \dot{U}_B \cdot \dot{I}_B^* = 220 e^{-j120^\circ} \cdot 34.37 e^{j81^\circ} = 7561 e^{-j39^\circ} = U_B \cdot I_B \cdot e^{j\varphi_{Z_b}}.$$

$$\dot{S}_C = \dot{U}_C \cdot \dot{I}_C^* = 220 e^{j120^\circ} \cdot 38,9 e^{-j75^\circ} = 8558 e^{j45^\circ} = U_C \cdot I_C \cdot e^{j\varphi_{Z_c}}.$$

Определим коэффициент мощности трехфазной цепи в целом:

$$\cos \varphi = \cos(28^\circ) = 0,88.$$

2. Расчет четырехпроводной трехфазной цепи соединением «звезда»-«звезда» с отсутствующим нейтральным проводом.

На схеме введем следующие обозначения (рис.6.7):

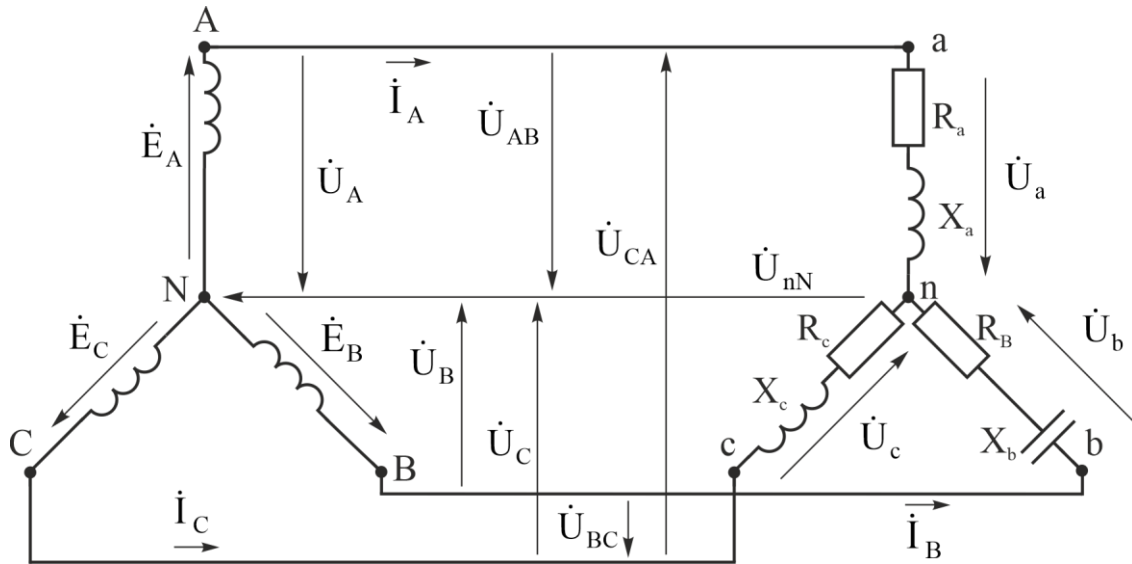


Рис. 6.7

$$\begin{aligned} \dot{U}_A \neq \dot{U}_a, \quad \dot{U}_B \neq \dot{U}_b, \quad \dot{U}_C \neq \dot{U}_c, \\ \dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}. \end{aligned}$$

3. Найдем общую проводимость:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c &= \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} = \frac{1}{5.8e^{j59^\circ}} + \frac{1}{6.4e^{-j39^\circ}} + \frac{1}{5.7e^{j45^\circ}} = \\ &= 0.17e^{-j59^\circ} + 0.16e^{j39^\circ} + 0.18e^{-j45^\circ} = 0.088 - j0.146 + 0.124 + j0.101 + 0.127 - j0.127 = \\ &= 0.34 - j0.17 = 0.38e^{-j27^\circ}. \end{aligned}$$

4. Определим U_{nN} , значение тока нейтрали берется из предыдущего расчета:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{Y}_a \cdot \dot{U}_A + \dot{Y}_b \cdot \dot{U}_B + \dot{Y}_c \cdot \dot{U}_C}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c} = \frac{\dot{I}_N}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_b + \dot{Y}_c} = \frac{45.4e^{-j40^\circ}}{0.38e^{-j27^\circ}} = 119.5e^{-j13^\circ} = 116.44 - j27.$$

Определим фазные напряжения приемника $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= 220 - 116.44 + j26.9 = 103.6 + j27 = 107e^{j15^\circ}, \\ \dot{U}_b &= -110 - j190.5 - 116.44 + j27 = -226.4 - j163.6 = 279.3e^{-j144^\circ}, \\ \dot{U}_c &= -110 + j190.5 - 116.44 + j27 = -226.4 + j217.4 = 314e^{j137^\circ}. \end{aligned}$$

5. Вычислим $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_a}{\dot{Z}_a} = \frac{107e^{j15^\circ}}{5.8e^{j59^\circ}} = 18.5e^{-j44^\circ}, \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_b}{\dot{Z}_b} = \frac{279.3e^{-j144^\circ}}{6.4e^{-j39^\circ}} = 43.6e^{-j105^\circ}, \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_c}{\dot{Z}_c} = \frac{314e^{j137^\circ}}{5.7e^{j45^\circ}} = 55.1e^{j92^\circ}. \end{aligned}$$

Докажем тождество: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$.

$$18.5e^{-j44^\circ} + 43.6e^{-j105^\circ} + 55.1e^{j92^\circ} = 13.3 - j12.9 - 11.3 - j42.1 - 1.92 + j55.1 = I_{\text{ож}} = 0.08 + j0.1 \approx 0.$$

дество выполняется.

Построим векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений (рис. 6.8, а, б).

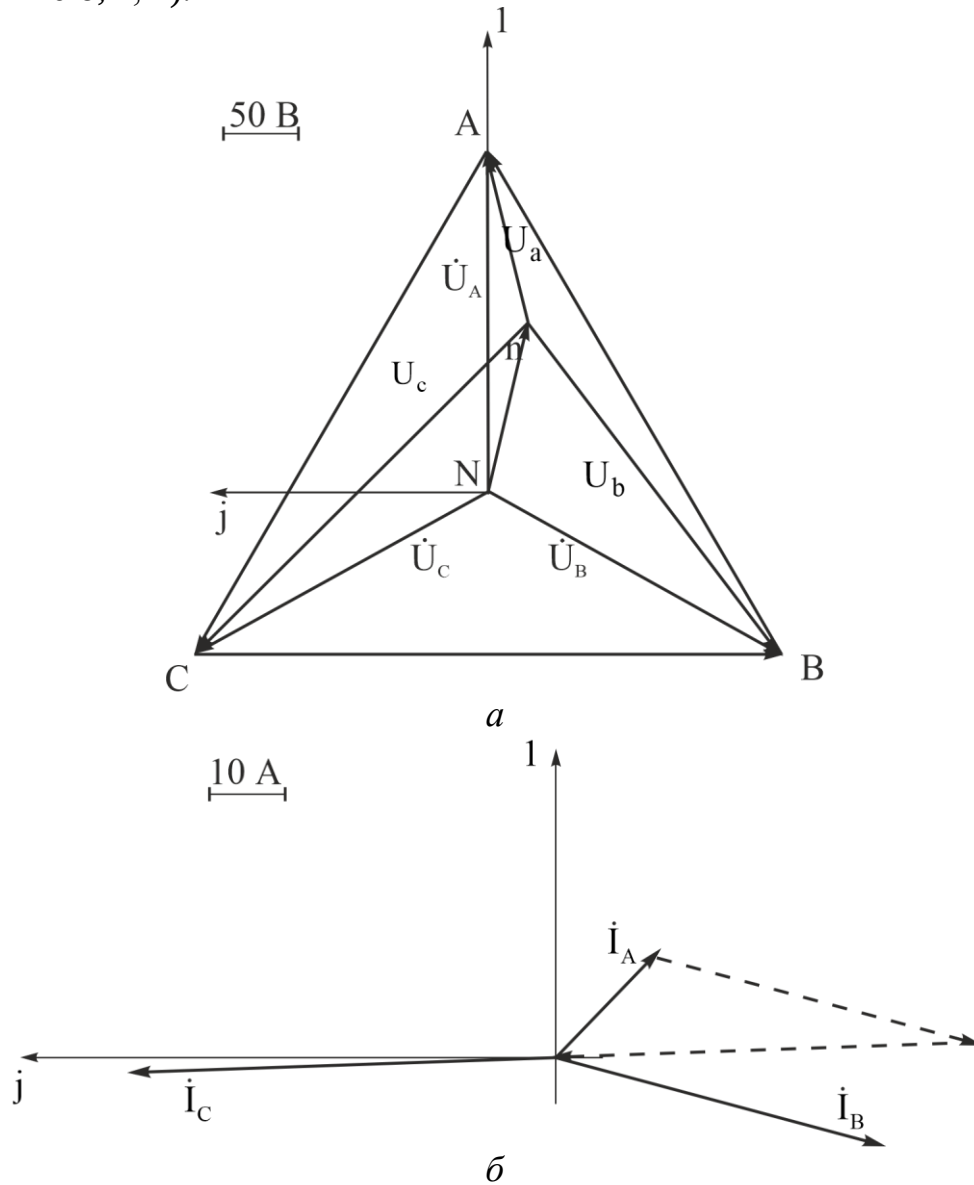


Рис. 6.8

Определим мощности каждой фазы:

комплексная мощность $\dot{S}_a$:

$$\dot{S}_a = U_a \cdot I_A e^{j\phi_{za}} = 107 \cdot 18.5 e^{j59^\circ} = 1980 e^{j59^\circ} = 1020 + j1697;$$

полная мощность $S_a = 1,98$ кВА; активная мощность $P_a = 1,02$ кВт; реактивная мощность $Q_a = 1,69$ кВАр;

комплексная мощность $\dot{S}_b$:

$$\dot{S}_b = U_b \cdot I_B e^{j\phi_{zb}} = 279.3 \cdot 43.6 e^{-j39^\circ} = 12178 e^{-j39^\circ} = 9464 - j7664;$$

полная мощность $S_b = 12,18$ кВА; активная мощность $P_b = 9,47$ кВт; реактивная мощность $Q_a = -7,66$ кВАр;

комплексная мощность $\dot{S}_c$:

$$\dot{S}_c = U_c \cdot I_c e^{j\phi_{zc}} = 314 e^{j137^\circ} \cdot 55.1 e^{j45^\circ} = 17301 e^{j45^\circ} = 12230 + j12230;$$

полная мощность $S_c = 17,3$ кВА; активная мощность $P_c = 12,23$ кВт; реактивная мощность $Q_c = 12,23$ кВАр.

Определим мощности трехфазной цепи в целом:

$$\dot{S} = \dot{S}_a + \dot{S}_b + \dot{S}_c = (P_a + P_b + P_c) + j(Q_a + Q_b + Q_c) = 22720 + j6260 = 23566 e^{j15^\circ}.$$

Определим коэффициент мощности трехфазной цепи в целом:

$$\cos \varphi = \cos(13^\circ) = 0,966.$$

6.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА № 6. РАСЧЕТ РЕЖИМА РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Необходимо:

1. Рассчитать четырехпроводную трехфазную цепь соединения «звезда»-«звезда» (рис.6.5):

- определить фазные токи и ток нейтрального провода, построить векторную диаграмму токов, проверить выполнение первого закона Кирхгофа;
- определить комплексную, полную, активную, реактивную мощности каждой фазы и трехфазной цепи в целом, определить коэффициент мощности симметричной трехфазной системы.

2. Рассчитать трехпроводную трехфазную цепь соединения «звезда»-«звезда» (рис. 6.6):

- определить фазные токи, построить векторную диаграмму токов, проверить выполнение I закона Кирхгофа;
- определить напряжение смещения нейтрали и напряжения в фазах приемника;
- определить полную активную реактивную мощность каждой фазы и трехфазной цепи в целом, определить коэффициент мощности симметричной трехфазной системы;
- построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений в схеме. Диаграммы изобразить на единой комплексной плоскости.

Исходные данные:

- номер группы $N_{гр} = \frac{624}{abc}$, номер студента по журналу $N_{ст} = \frac{12}{km}$;
- напряжение $\dot{U}_A = 220 e^{j0^\circ}$; $\dot{U}_B = 220 e^{-j120^\circ}$; $\dot{U}_C = 220 e^{j120^\circ}$, [В];
- сопротивление $R_a = b + k$, [Ом];
- сопротивление $R_b = |a + b + c - m|$, [Ом] (если $a + b + c = m$, $R_b = 1$)
- сопротивление $R_c = c + k$, [Ом];
- реактивное сопротивление $X_a = j(m - b + k)$, [Ом];
- реактивное сопротивление $X_b = j((-1)^{k+m}(a + k - c))$, [Ом];
- реактивное сопротивление $X_c = j((-1)^{b+m}(b + c - k))$, [Ом].

7. РАСЧЕТ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ

7.1. РАСЧЕТ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К нелинейному элементу (полупроводниковому диоду) приложено напряжение (рис. 7.1), имеющее постоянную и переменную составляющие:

$$u(t) = U_0 + U_m \cdot \cos \omega t.$$

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) нелинейного элемента и временные диаграммы тока и напряжения изображены на рис. 7.2, а, б. В расчетном задании используется кусочно-линейная аппроксимация ВАХ нелинейного элемента. При $u(t) < U_1$ (U_1 – пороговое напряжение) диод смещен в обратном направлении и не пропускает ток, его сопротивление $R_d \rightarrow \infty$. При $u(t) \geq U_1$ диод смещен в прямом направлении и его ток линейно зависит от приложенного напряжения. Наклон ВАХ нелинейного элемента характеризуется крутизной $S = \Delta I / \Delta U$ [мА/В]. Величина, обратная крутизне, является сопротивлением диода в прямом направлении $R_d = 1/S$. [5]

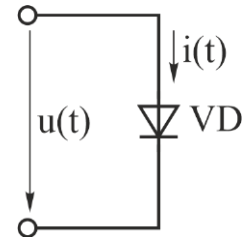


Рис. 7.1

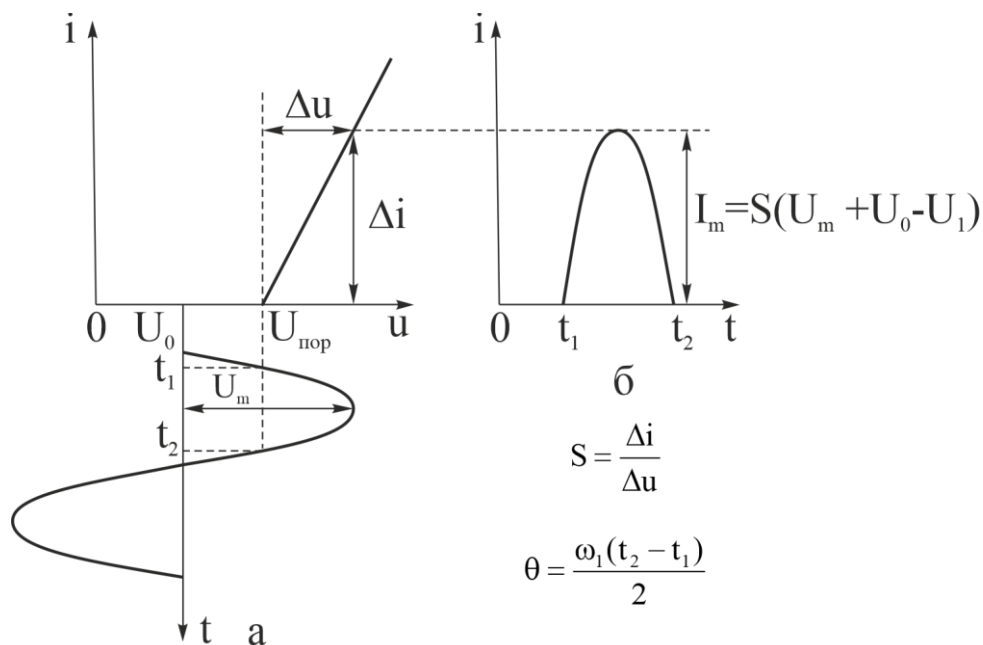


Рис. 7.2

7.2. ПРИМЕР РАСЧЕТА СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ

Исходные данные:

$$U_0 = 0,5 \text{ В},$$

$$U_1 = 1 \text{ В},$$

$$U_m = 1,5 \text{ В},$$

$$S = 16 \text{ мА/В},$$

$$T = 11 \text{ мкс}.$$

1. Рассчитаем угол отсечки θ в радианах и градусах:

$$\cos\theta = \frac{(U_1 - U_0)}{U_m},$$

$$\theta = \arccos(\cos\theta) = 1.231 \text{ радиан}; \theta = 70.529 \text{ градусов}.$$

2. Рассчитаем амплитуду тока диода

$$I_m = S \cdot U_m (1 - \cos\theta) = 16 \text{ мА}.$$

3. Запишем выражение для мгновенного значения тока:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T},$$

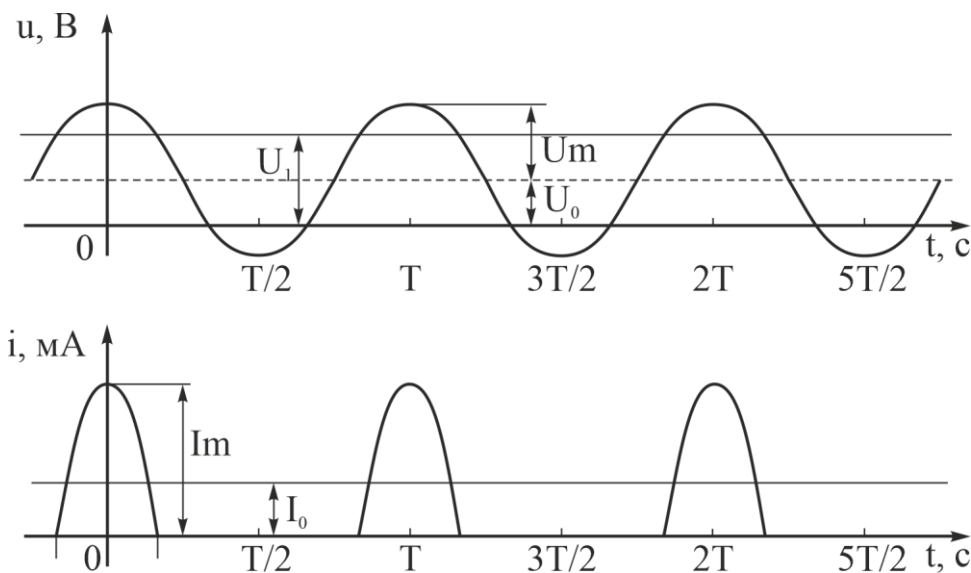
$$\omega_1 = 5.71 \cdot 10^5,$$

$$i(t) = \frac{I_m}{1 - \cos(\theta)} \cdot (\cos(\omega_1 \cdot t) - \cos(\theta)).$$

Вычислим постоянную составляющую тока

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta}^{-\theta} i(t) d(\omega t) = I_m \frac{\sin\theta - \theta \cdot \cos\theta}{\pi(1 - \cos\theta)} = 4.068 \text{ мА}.$$

4. Изобразим временные диаграммы напряжения $U(t)$ и тока $i(t)$.



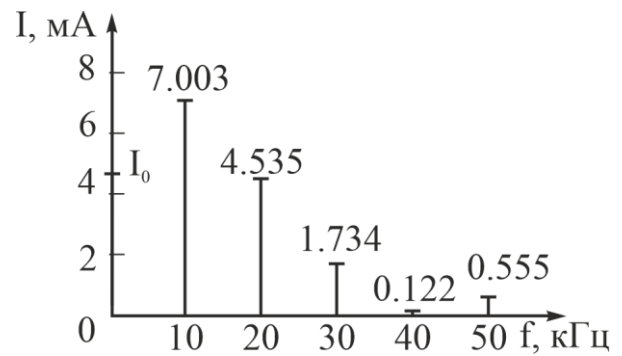
5. Вычислим амплитуду первой гармоники

$$I_1 = \frac{1}{\pi} \int_{\theta}^{-\theta} i(t) \cdot \cos\omega t \cdot d(\omega t) = I_m \frac{\theta - \sin\theta \cdot \cos\theta}{\pi(1 - \cos\theta)} = 7.003 \text{ мА}.$$

6. Используя общее выражение для n -й гармоники тока, рассчитаем амплитуды второй, третьей, четвертой и пятой гармоник тока:

$$I_{mn} = I_m \frac{2(\sin\theta \cdot \cos\theta - n \cdot \cos(n \cdot \theta) \sin\theta)}{\pi \cdot n \cdot (n^2 - 1) \cdot (1 - \cos\theta)}.$$

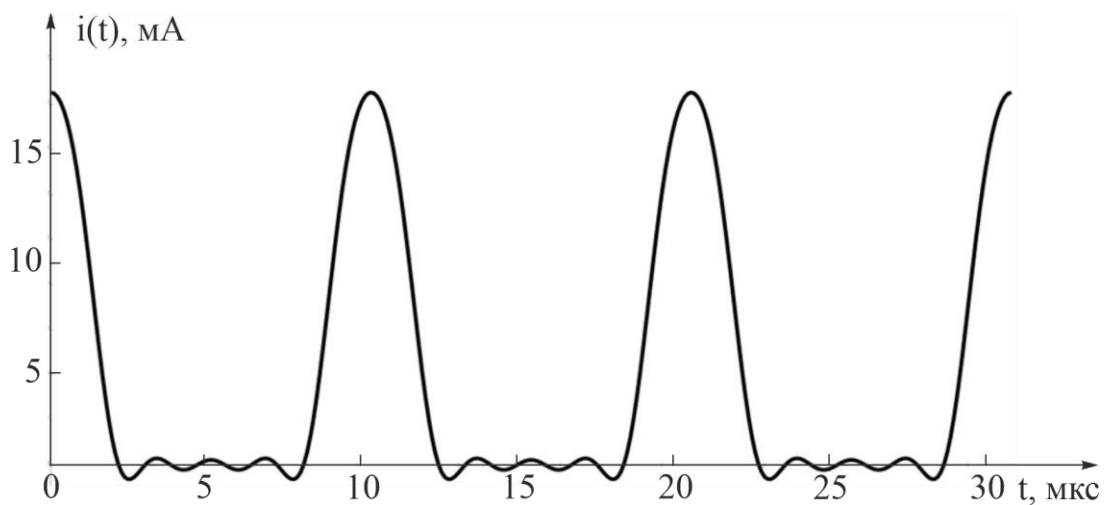
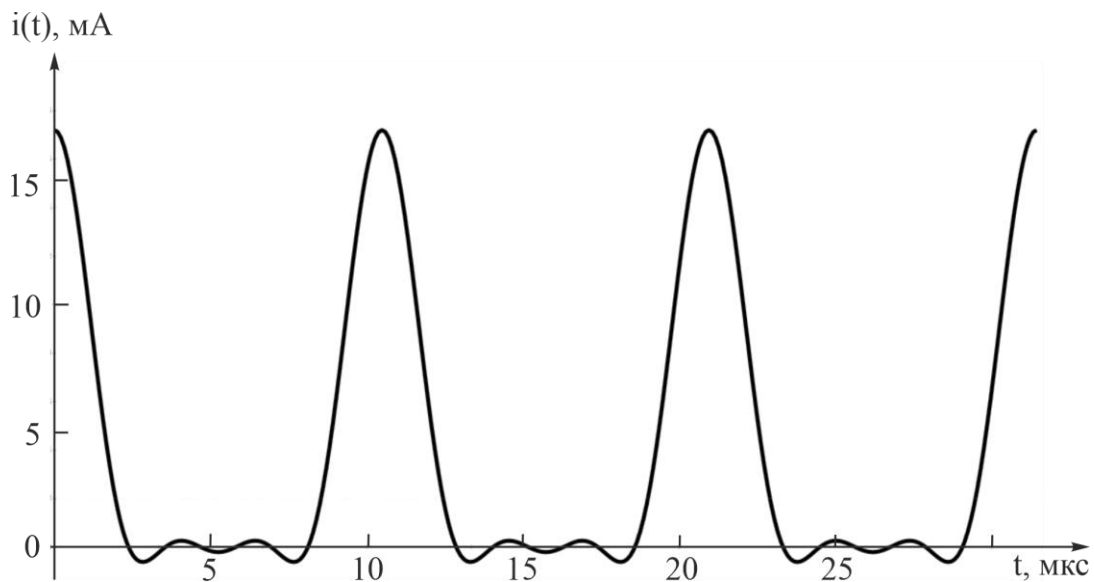
$I_{m2}=4.536 \text{ мА},$
 $I_{m3}=1.734 \text{ мА},$
 $I_{m4}=-0.122 \text{ мА},$
 $I_{m5}=-0.555 \text{ мА},$
 $I_{m6}=-0.555 \text{ мА},$
 $I_{m7}=-0.555 \text{ мА},$
 $I_{m8}=-0.555 \text{ мА},$
 $I_{m9}=-0.555 \text{ мА}.$

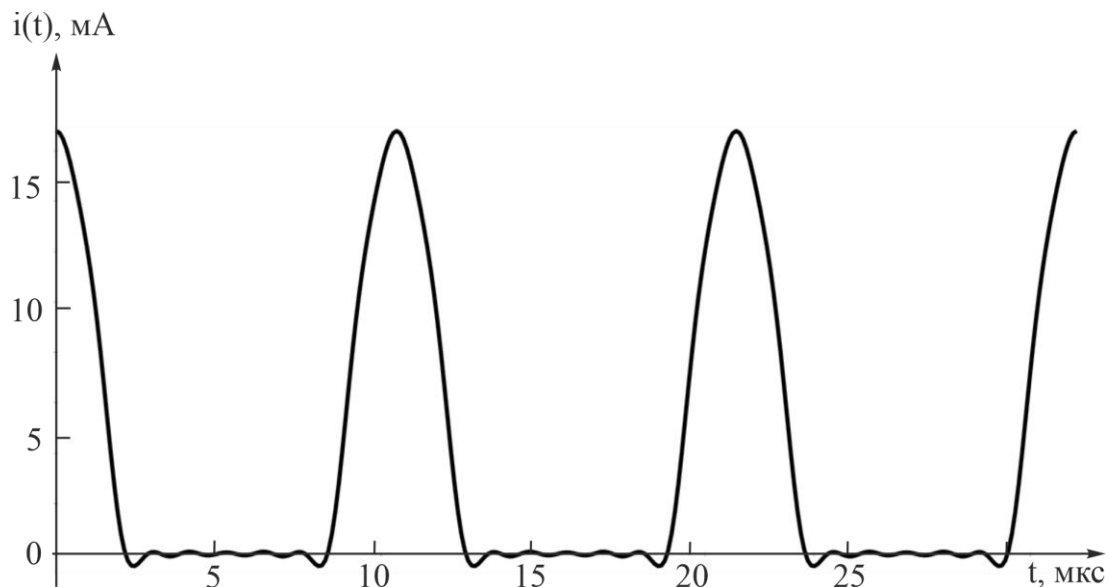
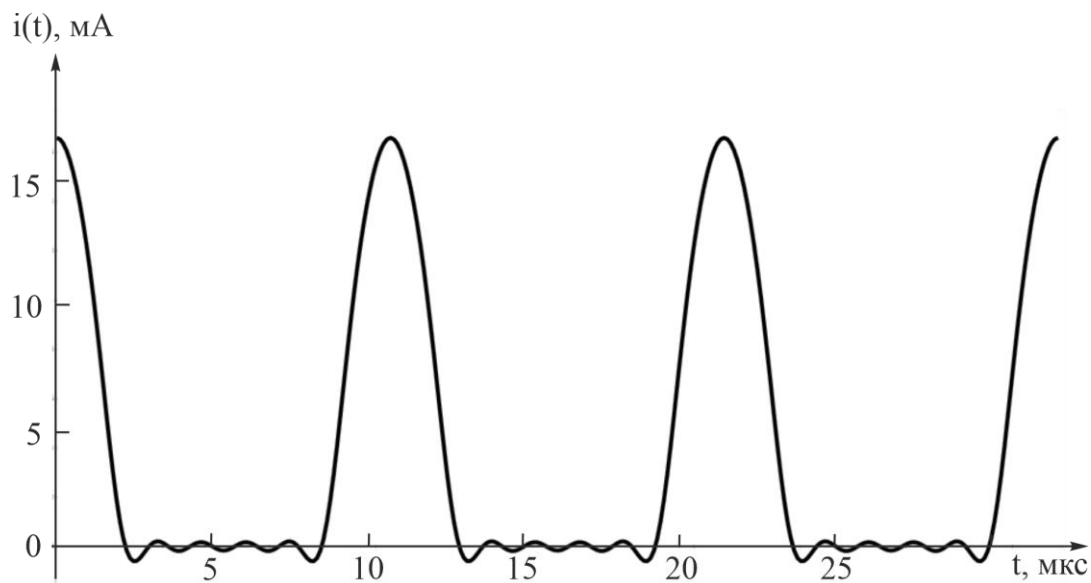


7. По полученным данным построим диаграмму спектра тока нелинейного элемента.

8. Используя вычислительные возможности программы Mathcad, построим временную диаграмму тока для первых трех, пяти, семи, девяти гармоник:

$$i(t) = I_0 + I_{m1} \cos \omega_1 t + I_{m2} \cos 2\omega_1 t + I_{m3} \cos 3\omega_1 t + I_{m4} \cos 4\omega_1 t + I_{m5} \cos 5\omega_1 t.$$





7.3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА № 7. РАСЧЕТ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ

Необходимо

Исходные данные для расчета определяются по следующим правилам:

- номер группы $N_{гр} = \frac{624}{abc}$, номер студента по журналу $N_{ст} = \frac{12}{km}$;
- для всех вариантов постоянная составляющая входного сигнала $U_0 = 0,5$ В, пороговое напряжение нелинейного элемента $U_1 = 1$ В;
- амплитуда переменной составляющей входного напряжения $U_m = 1 + 0,1m$ [В];
- крутизна ВАХ нелинейного элемента $S = c + N_{ст}$ [мА/В];
- период колебаний переменной составляющей входного напряжения $T = N_{ст}$ [мкс], $\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ [рад/с] – основная частота спектра сигнала.

1. Рассчитать угол отсечки θ , в радианах и градусах:

$$\cos \theta = \frac{U_1 - U_0}{U_m},$$

в дальнейших расчетах использовать угол θ в радианах.

2. Рассчитать амплитуду тока диода

$$I_m = S \cdot U_m (1 - \cos \theta).$$

3. Записать выражение для мгновенного значения тока

$$i(t) = \frac{I_m}{1 - \cos \theta} (\cos \omega t - \cos \theta), \quad -\theta \leq \omega t \leq \theta.$$

4. Вычислить постоянную составляющую тока

$$I_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta}^{\theta} i(t) d(\omega t) = I_m \cdot \frac{\sin \theta - \theta \cdot \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)}.$$

5. Изобразить временные диаграммы напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ в соответствии с рис. 7.3.

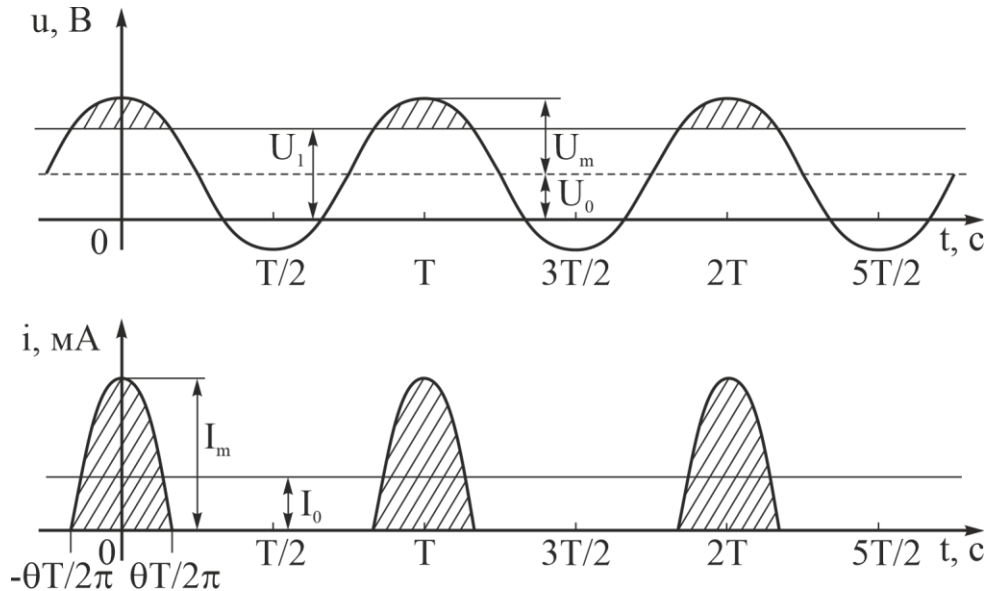


Рис. 7.3

6. Вычислить амплитуду первой гармоники тока

$$I_{m1} = \frac{1}{\pi} \int_{-\theta}^{\theta} i(t) \cdot \cos \omega t \cdot d(\omega t) = I_m \cdot \frac{\theta - \sin \theta \cdot \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)}.$$

7. Используя общее выражение для n-й гармоники тока

$$I_{mn} = I_m \frac{2(\sin \theta \cos \theta - n \cdot \cos(n \cdot \theta) \sin \theta)}{\pi \cdot n \cdot (n^2 - 1) \cdot (1 - \cos \theta)},$$

рассчитать амплитуды второй, третьей, четвертой и пятой гармоник тока I_{m2} , I_{m3} , I_{m4} , I_{m5} .

8. По полученным данным построить диаграмму спектра тока нелинейного элемента (пример на рис. 7.4).

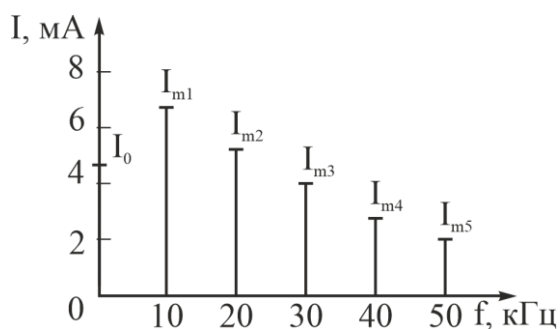


Рис. 7.4

9.Используя вычислительные возможности программы Mathcad, построить временную диаграмму тока для первых трех, пяти, семи, девяти гармоник:

$$i(t) = I_0 + I_{m1} \cos \omega_1 t + I_{m2} \cos 2\omega_1 t + I_{m3} \cos 3\omega_1 t + I_{m4} \cos 4\omega_1 t + I_{m5} \cos 5\omega_1 t \dots$$

Библиографический список

1. Теоретические основы электротехники: учеб. пособие/ В.С. Гуров, Е.В. Мамонтов, С.А. Круглов, Т.А. Глебова. Рязань: РГРТУ, 2011. 140 с.
2. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов. СПб.:Питер, 2003. 376 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учеб. для вузов. М.:Гардарики, 2002. 638 с.
4. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Л.: Энергоиздат, 1981. 533 с.
5. Бессонов Л.А., Демидова И.Г., Заруди М.Е. и др. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. М.: Высшая школа, 2000.
6. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1990.
7. Коровкин Н.В., Семина Е.Е., Чечурин В. Л. Теоретические основы электротехники. Сборник задач: учеб. пособ. для вузов. СПб.: Питер, 2004.
8. Прянишников В.А., Петров Е.А., Осипов Ю.М. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах: практ. пособие. СПб.: Корона-принт, 2001.

Задание на курсовой проект (работу)

Дисциплина: Теоретические основы электротехники

Студент _____ ФИО _____ группа _____

1. Темы:

3-й семестр «Расчет режимов работы электрических цепей»;

4-й семестр «Расчет переходных процессов в электрических цепях».

2. Срок представления проекта (работы) к защите _____ 20__ г.

3. Исходные данные для проектирования (научного исследования)

4. Содержание пояснительной записки курсового проекта (работы).

4.1. Задание на курсовой проект (работу).

3-й семестр:

4.2. Расчет общего сопротивления.

4.3. Расчет цепи постоянного тока.

4.4. Расчет цепи синусоидального тока.

4-й семестр

4.5. Расчет переходных процессов в цепи первого порядка.

4.6. Расчет переходных процессов в цепи второго порядка.

4.7. Расчет режима работы трехфазной цепи (по заданию преподавателя)*.

4.8. Расчет режима работы электрической цепи при периодическом не-синусоидальном воздействии (по заданию преподавателя)*.

4.9. Список использованной литературы.

5. Перечень графического материала.

6. Приложение.

Для п. 4.2: заданная схема для расчета и схемы, полученные после каждого преобразования.

Для п. 4.3: заданная схема для расчета; эквивалентная схема для расчета каждым указанным методом.

Для п. 4.4: заданная схема для расчета; векторная диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений; графики мгновенных значений напряжения, тока и мощности на источнике ЭДС; треугольник мощностей.

Для п. 4.5: заданная схема для расчета, схема для определения начальных условий, схема для определения характеристического сопротивления, схема для

нахождения принужденной составляющей, временные диаграммы тока и напряжения на реактивном элементе.

Для п. 4.6: заданная схема для расчета, схема для определения начальных условий, схема для определения характеристического сопротивления, схема для нахождения принужденной составляющей, временная диаграмма независимой переменной.

Для п. 4.7: схемы соединения приемника с генератором, векторные и топографические диаграммы.

Для п. 4.8: схема цепи, ВАХ нелинейного элемента с наложенным входным воздействием и реакцией цепи, диаграммы напряжения и тока, спектр тока, временная диаграмма суммы первых пяти членов ряда и постоянной составляющей.

* – пункт вносится в курсовой проект (работу) по указанию преподавателя

Руководитель проекта (работы) _____

Задание принял к исполнению _____

Оглавление

1. Расчет общего сопротивления.....	1
2. Расчет сложной линейной электрической цепи постоянного тока.....	5
3. Расчет цепи синусоидального тока.....	20
4. Расчет переходного процесса в электрической цепи первого порядка...31	
5. Расчет переходного процесса в электрической цепи второго порядка...41	
6. Расчет режима работы трехфазной цепи.....	49
7. Расчет спектров сигналов при нелинейных преобразованиях.....	57
Библиографический список.....	62
Приложение. Задание на курсовой проект (работу).....	63