

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное
образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»

Н. К. ЛОГВИНОВА, З. В. ЗАЙЦЕВА

ТЕОРИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ
В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ
ПРАКТИКУМ

Часть 1

СПбГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2013

УДК 621.311(077)

ББК 31.211я73

Л69

Рецензент

доктор технических наук, профессор кафедры СЭУ В. А. Филин

Рекомендовано к печати

редакционно-издательским советом СПбГУТ

Логвинова, Н. К.

Л69

Теория электрических цепей. Анализ стационарных колебаний в линейных электрических цепях : практикум. Ч. 1 / Н. К. Логвинова, З. В. Зайцева ; СПбГУТ. – СПб., 2013. – 87 с.

Содержит учебные задания, методические указания по их выполнению и теоретический материал в виде алгоритмов, формул, определений; контрольные вопросы; литературу.

Предназначено в качестве заданий и рекомендаций для организации самостоятельной работы при подготовке бакалавров по направлениям: 210700, 210400, 221700, 210100, 200700, 230100, 230400, 231000, 220700, 211000, 201000.

УДК 621.311(077)

ББК 31.211я73

© Логвинова Н. К., Зайцева З. В., 2013

© Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	6
1.1. Метод эквивалентных преобразований	6
1.2. Метод наложения.....	11
1.3. Метод токов ветвей	16
1.4. Метод узловых напряжений	20
1.4.1. Метод узловых напряжений в резистивных цепях с источниками тока.....	22
1.4.2. Метод узловых напряжений в резистивных цепях с источниками тока и с источниками напряжения.....	27
1.5. Метод контурных токов	32
1.6. Метод эквивалентного генератора	38
2. СИМВОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ	45
2.1. Комплексные сопротивления и проводимости пассивных двухполюсников	45
2.2. Символический метод анализа гармонических колебаний в разветвленных цепях.....	49
2.3. Символический метод анализа гармонических колебаний в цепях с индуктивными связями	52
3. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА. КОМПЛЕКСНЫЕ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ	61
3.1. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики пассивных четырёхполюсников	61
3.2. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики активных РС-цепей	64
4. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ. КОМПЛЕКСНЫЕ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ И ИХ ЭЛЕКТРОННЫХ АНАЛОГОВ.....	70
4.1. Параметры последовательного колебательного контура	71
4.2. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики последовательного колебательного контура.....	72
4.3. Частотные характеристики электронных аналогов последовательного колебательного контура.....	74
5. ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ. УРАВНЕНИЯ ПЕРЕДАЧИ. СОБСТВЕННЫЕ И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ	78
5.1. Собственные Н-параметры и А-параметры четырехполюсника	80
5.2. Характеристические параметры четырехполюсника.....	83
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	85

ВВЕДЕНИЕ

Предназначено для студентов, обучающихся по дисциплинам: «Теория электрических цепей» и «Электротехника и электроника», и подготовлено в соответствии с действующей программой.

Практикум «Анализ стационарных колебаний в линейных электрических цепях» предназначен для организации самостоятельной работы студентов, а также может использоваться для выполнения курсовой работы, которая представлена совокупностью заданий. Практикум способствует усвоению теоретического материала и состоит из блоков заданий по пяти основным темам дисциплин: методы анализа резистивных ЭЦ в режиме постоянного тока; символический метод анализа гармонических колебаний ЭЦ; частотные характеристики ЭЦ первого порядка, комплексные передаточные функции; резонанс в ЭЦ, комплексные передаточные функции и частотные характеристики колебательных контуров и их электронных аналогов; четырехполюсники, уравнения передачи, собственные и характеристические параметры четырехполюсников. Каждый блок заданий включает несколько разделов, отличающихся постановкой задач, способами их решения, особенностями рассматриваемых цепей.

Каждый раздел содержит 26 задач одинакового уровня сложности с номером из трех чисел. Первое число – это номер блока заданий, второе – номер раздела в блоке, третье – номер задачи в разделе. Задачи в разделе имеют номера от 0 до 25. Задача с номером «0» является типовой, и ее решение позволяет раскрыть особенности решения остальных задач раздела. Ее объясняет студентам преподаватель на практическом занятии. Из задач с номерами от 1 до 25 студент решает самостоятельно одну, соответствующую номеру варианта, который ему присваивает преподаватель в начале семестра.

Для проверки правильности решения студенту рекомендуется выполнить компьютерный анализ заданных задач с использованием программы FASTMEAN. Программа FASTMEAN позволяет рассчитать ЭЦ в режимах постоянного тока и гармонических колебаний, рассчитать частотные характеристики ЭЦ и получить аналитические формулы, используя «Символьный анализ». Студент должен сравнить результаты аналитического и компьютерного анализов и при их несовпадении найти ошибки самостоятельно или обратиться к преподавателю.

Для оказания помощи в самостоятельной работе студентов при выполнении практических заданий по всем темам дисциплины приведены номера страниц литературы [1, 2].

В конце каждого блока заданий по изучаемым темам даны контрольные вопросы. При подготовке к ответам на них студент может оценить свой уровень знаний и степень подготовленности как к текущему контролю, так и к итоговому – теоретическому зачету.

После решения задач своего варианта всех разделов блока студент проходит текущий контроль. Последний состоит из решения задач по темам одного или нескольких блоков, которые дает преподаватель. Студент, выполнивший все блоки, успешно прошедший текущий контроль, а также выполнивший и защитивший лабораторные работы, допускается к сдаче теоретического зачета.

1. МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При анализе используется согласный выбор положительных направлений напряжений и токов в ветвях анализируемых цепей.

1.1. Метод эквивалентных преобразований

[1, с. 50–55; 2, с. 30–33, 43–47]

Метод эквивалентных преобразований используется для расчета напряжений и токов ветвей электрических цепей (ЭЦ) с одним источником напряжения u_0 или источником тока i_0 с применением закона Ома и законов Кирхгофа.

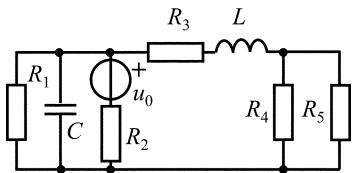
При расчете цепей с пассивными элементами R , L , C в режиме постоянного тока необходимо учитывать, что напряжение на зажимах любой индуктивности L равно нулю, поскольку при $i_L = \text{const}$ $u_L = L \frac{di_L}{dt} = 0$, и ток через любую емкость C тоже равен нулю, поскольку при $u_C = \text{const}$ $i_C = C \frac{du_C}{dt} = 0$. Таким образом, в схеме анализируемой цепи можно замкнуть накоротко зажимы индуктивности и разомкнуть зажимы емкости, а затем, получив резистивную ЭЦ, находить искомые постоянные напряжения и токи.

При выполнении задач 1.1.0–1.1.25 рекомендуется следующая последовательность действий:

- нарисуйте заданную схему цепи для ее расчета в режиме постоянного тока;
- рассчитайте методом эквивалентных преобразований токи ветвей заданной цепи;
- рассчитайте значения напряжения на емкости u_C и тока через индуктивность i_L ;
- рассчитайте в джоулях энергию, запасенную в емкости

$$W_C = \frac{Cu_C^2}{2} \text{ и в индуктивности } W_L = \frac{Li_L^2}{2}.$$

1.1.0



$u_0 = 10 \text{ В}, R_1 = 100 \text{ Ом}, R_2 = 50 \text{ Ом},$
 $R_3 = 76 \text{ Ом}, R_4 = 40 \text{ Ом}, R_5 = 60 \text{ Ом},$
 $C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$

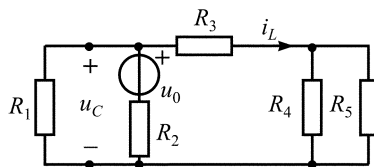
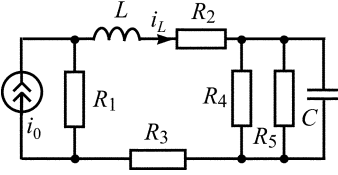
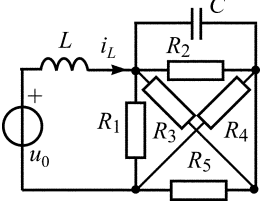
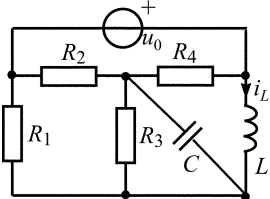
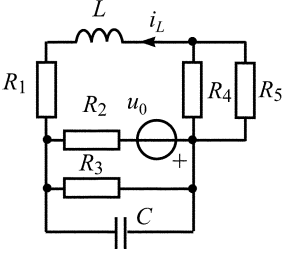
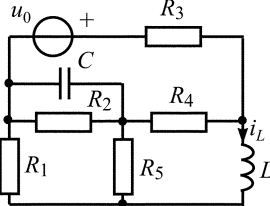
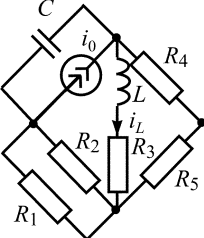
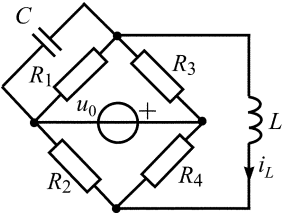
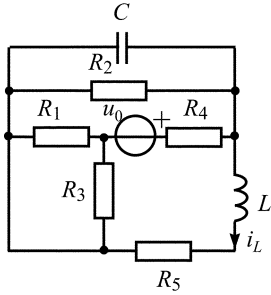
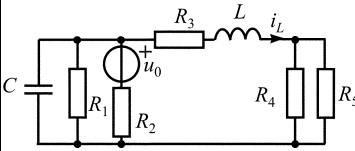
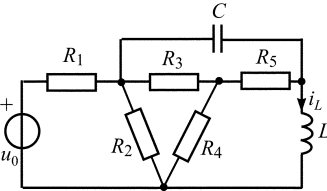
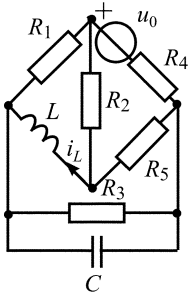
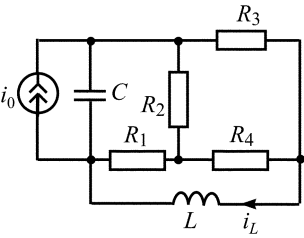


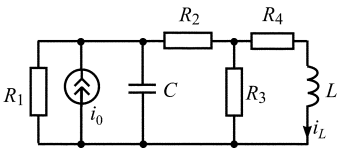
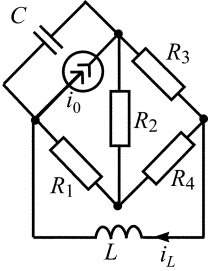
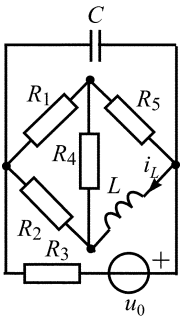
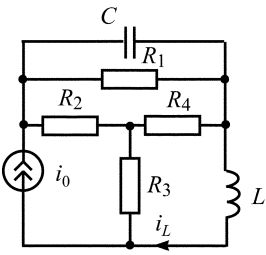
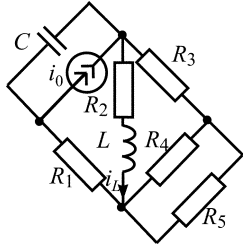
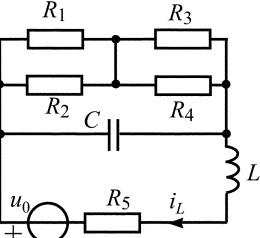
Схема цепи
 в режиме постоянного тока

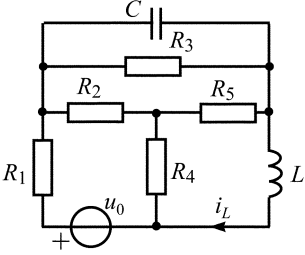
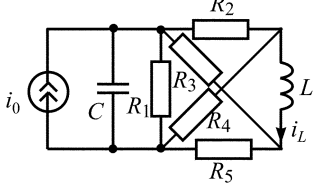
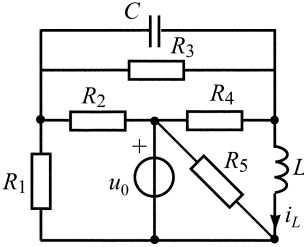
Таблица 1.1

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.1.1	<p>$i_0 = 100 \text{ мА}, R_1 = 60 \text{ Ом},$ $R_2 = 70 \text{ Ом}, R_3 = 30 \text{ Ом},$ $R_4 = 19 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$</p>	1.1.2	<p>$i_0 = 0,4 \text{ А}, R_1 = R_2 = R_4 = 50 \text{ Ом},$ $R_3 = 25 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$</p>
1.1.3	<p>$i_0 = 160 \text{ мА}, R_1 = 80 \text{ Ом},$ $R_3 = 180 \text{ Ом}, R_2 = R_4 = 200 \text{ Ом},$ $C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$</p>	1.1.4	<p>$u_0 = 10 \text{ В}, R_1 = 15 \text{ Ом}, R_2 = 20 \text{ Ом},$ $R_3 = 12 \text{ Ом}, R_4 = R_5 = 16 \text{ Ом},$ $C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$</p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.1.5	 <p> $i_0 = 100 \text{ мА}, R_1 = R_3 = 2 \text{ кОм},$ $R_2 = R_4 = R_5 = 4 \text{ кОм}, C = 0,1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.6	 <p> $u_0 = 30 \text{ В}, R_1 = R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом},$ $R_4 = R_5 = 200 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>
1.1.7	 <p> $u_0 = 45 \text{ В}, R_1 = 150 \text{ Ом},$ $R_2 = 110 \text{ Ом}, R_3 = 60 \text{ Ом},$ $R_4 = 120 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.8	 <p> $u_0 = 45 \text{ В}, R_1 = 120 \text{ Ом}, R_2 = 50 \text{ Ом},$ $R_3 = 200 \text{ Ом}, R_4 = 400 \text{ Ом},$ $R_5 = 100 \text{ Ом}, C = 0,1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>
1.1.9	 <p> $u_0 = 200 \text{ В}, R_1 = R_4 = R_5 = 6 \text{ кОм},$ $R_2 = 3 \text{ кОм}, R_3 = 2 \text{ кОм},$ $C = 0,01 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.10	 <p> $i_0 = 40 \text{ мА}, R_1 = R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом},$ $R_4 = R_5 = 50 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.1.11	 <p data-bbox="240 558 520 638"> $u_0 = 14 \text{ В}, R_1 = R_2 = 120 \text{ Ом},$ $R_3 = 400 \text{ Ом}, R_4 = 100 \text{ Ом},$ $C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.12	 <p data-bbox="688 558 957 662"> $u_0 = 28 \text{ В}, R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом},$ $R_3 = 400 \text{ Ом}, R_4 = 140 \text{ Ом},$ $R_5 = 150 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>
1.1.13	 <p data-bbox="201 893 554 981"> $u_0 = 75 \text{ В}, R_1 = R_5 = 200 \text{ Ом},$ $R_2 = R_3 = 180 \text{ Ом}, R_4 = 300 \text{ Ом},$ $C = 0,1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.14	 <p data-bbox="660 893 985 997"> $u_0 = 14 \text{ В}, R_1 = 40 \text{ Ом},$ $R_2 = 60 \text{ Ом}, R_3 = 20 \text{ Ом},$ $R_4 = R_5 = 80 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>
1.1.15	 <p data-bbox="285 1340 476 1444"> $u_0 = 21 \text{ В}, R_1 = 40 \text{ Ом},$ $R_2 = 10 \text{ Ом}, R_3 = 20 \text{ Ом},$ $R_4 = 50 \text{ Ом}, R_5 = 30 \text{ Ом},$ $C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.16	 <p data-bbox="672 1340 974 1444"> $i_0 = 80 \text{ мА}, R_1 = 150 \text{ Ом},$ $R_2 = 80 \text{ Ом}, R_3 = 140 \text{ Ом},$ $R_4 = 100 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.1.17	 <p> $i_0 = 100 \text{ mA}, R_1 = R_3 = 30 \text{ Ом},$ $R_2 = 18 \text{ Ом}, R_4 = 20 \text{ Ом},$ $C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.18	 <p> $i_0 = 100 \text{ mA}, R_1 = R_4 = 140 \text{ Ом},$ $R_2 = 70 \text{ Ом}, R_3 = 100 \text{ Ом},$ $C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>
1.1.19	 <p> $u_0 = 12 \text{ В}, R_1 = 110 \text{ Ом},$ $R_2 = 160 \text{ Ом}, R_3 = 70 \text{ Ом},$ $R_4 = R_5 = 100 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.20	 <p> $i_0 = 200 \text{ mA}, R_1 = 100 \text{ Ом},$ $R_2 = 30 \text{ Ом}, R_3 = 200 \text{ Ом},$ $R_4 = 300 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>
1.1.21	 <p> $i_0 = 200 \text{ mA},$ $R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = 40 \text{ Ом},$ $R_3 = 20 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.22	 <p> $u_0 = 10 \text{ В}, R_1 = 40 \text{ Ом},$ $R_2 = 60 \text{ Ом}, R_3 = 20 \text{ Ом},$ $R_4 = 80 \text{ Ом}, R_5 = 10 \text{ Ом},$ $C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.1.23	 <p> $u_0 = 15 \text{ В}, R_1 = 10 \text{ Ом}, R_2 = 40 \text{ Ом},$ $R_3 = 60 \text{ Ом}, R_4 = 100 \text{ Ом},$ $R_5 = 400 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>	1.1.24	 <p> $i_0 = 0,1 \text{ А}, R_1 = R_2 = 40 \text{ Ом},$ $R_3 = 60 \text{ Ом}, R_4 = 80 \text{ Ом},$ $R_5 = 20 \text{ Ом}, C = 1 \text{ мкФ},$ $L = 1 \text{ мГн}$ </p>
1.1.25	 <p> $u_0 = 12 \text{ В}, R_1 = R_3 = 100 \text{ Ом},$ $R_2 = 50 \text{ Ом}, R_4 = R_5 = 80 \text{ Ом},$ $C = 1 \text{ мкФ}, L = 1 \text{ мГн}$ </p>		

1.2. Метод наложения

[1, с. 14–15; 2, с. 47–48]

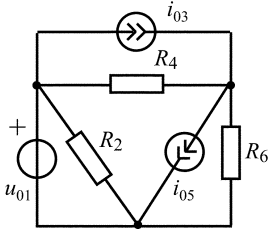
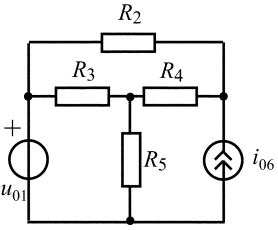
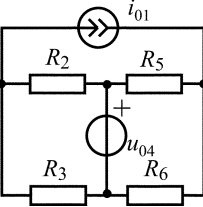
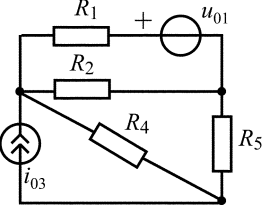
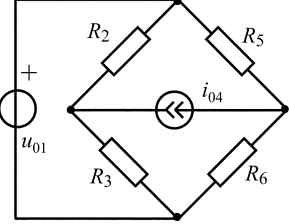
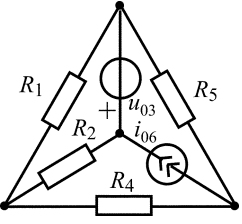
Метод наложения основан на принципе наложения (суперпозиции), согласно которому реакция линейной электрической цепи на совокупность воздействий равна сумме реакций, вызываемых в той же цепи каждым из воздействий в отдельности.

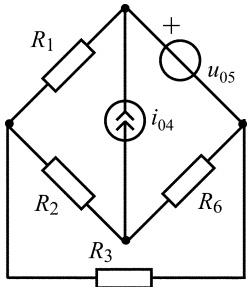
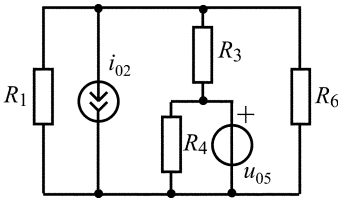
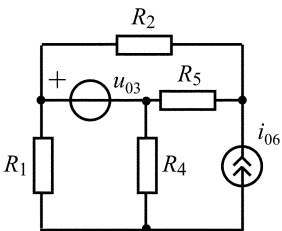
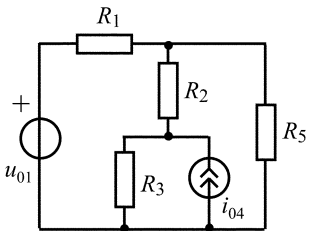
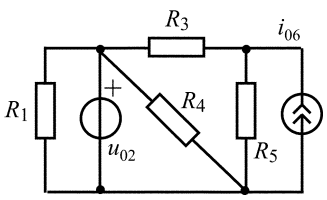
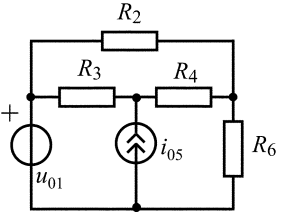
В задачах 1.2.0–1.2.25 при расчете токов ветвей заданной цепи методом наложения рекомендуется следующая последовательность действий:

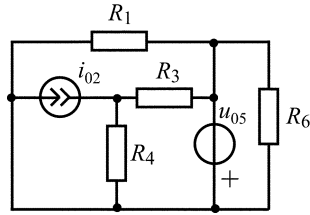
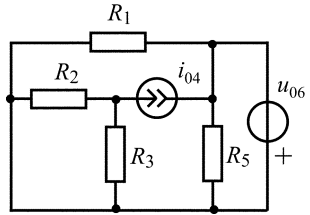
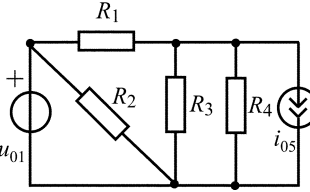
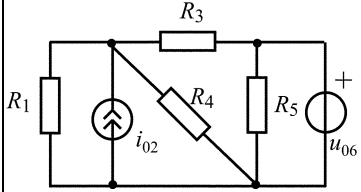
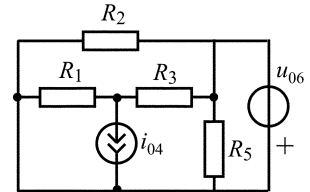
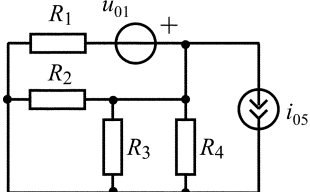
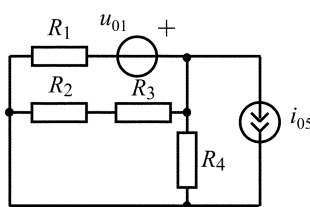
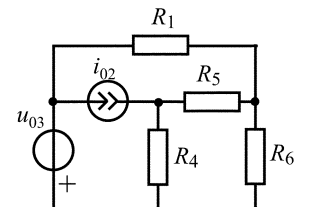
- нарисуйте схемы цепей с каждым источником в отдельности и покажите в них положительные направления токов. Вместо исключенного источника напряжения покажите его внутреннее сопротивление ($R_i = 0$), а вместо источника тока – ($R_i = \infty$);

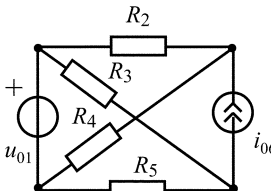
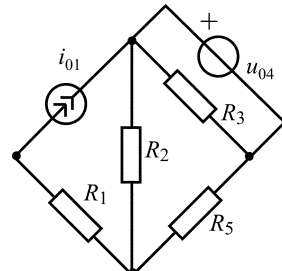
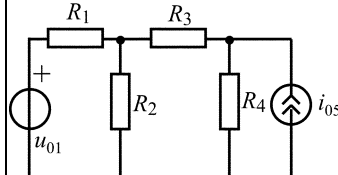
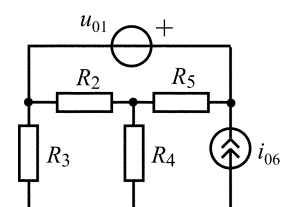
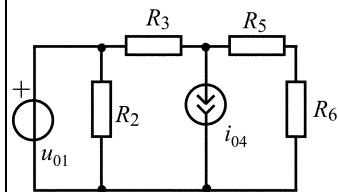
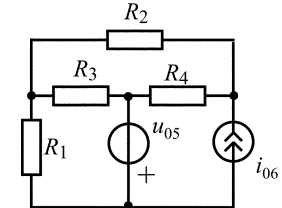
- рассчитайте методом эквивалентных преобразований токи ветвей в схемах цепей с одним источником (частичные токи);
- рассчитайте токи ветвей в заданной цепи как алгебраическую сумму частичных токов;
- сделайте проверку правильности расчета с помощью баланса мощностей.

Таблица 1.2

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.2.0	 <p> $u_{01} = 25 \text{ В}; i_{03} = 0,8 \text{ А};$ $i_{05} = 0,3 \text{ А}; R_2 = 100 \text{ Ом};$ $R_4 = 50 \text{ Ом}; R_6 = 70 \text{ Ом}$ </p>	1.2.1	 <p> $u_{01} = 18 \text{ В}; i_{06} = 0,9 \text{ А};$ $R_2 = 60 \text{ Ом}; R_3 = R_4 = R_5 = 20 \text{ Ом}$ </p>
1.2.2	 <p> $u_{04} = 80 \text{ В}; i_{01} = 1 \text{ А}; R_2 = 30 \text{ Ом};$ $R_3 = 70 \text{ Ом}; R_5 = R_6 = 50 \text{ Ом}$ </p>	1.2.3	 <p> $u_{01} = 9 \text{ В}; i_{03} = 0,3 \text{ А};$ $R_1 = R_2 = 50 \text{ Ом}; R_4 = R_5 = 25 \text{ Ом}$ </p>
1.2.4	 <p> $u_{01} = 24 \text{ В}; i_{04} = 0,6 \text{ А};$ $R_2 = 20 \text{ Ом}; R_3 = 60 \text{ Ом};$ $R_5 = 80 \text{ Ом}; R_6 = 40 \text{ Ом}$ </p>	1.2.5	 <p> $u_{03} = 60 \text{ В}; i_{06} = 0,18 \text{ А};$ $R_1 = R_2 = 400 \text{ Ом};$ $R_4 = R_5 = 200 \text{ Ом}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.2.6	 <p>$u_{05} = 10 \text{ В}; i_{04} = 0,1 \text{ А};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = 100 \text{ Ом}$</p>	1.2.7	 <p>$u_{05} = 12 \text{ В}; i_{02} = 60 \text{ mA};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 100 \text{ Ом}$</p>
1.2.8	 <p>$u_{03} = 20 \text{ В}; i_{06} = 0,5 \text{ А};$ $R_1 = 40 \text{ Ом}; R_2 = 80 \text{ Ом};$ $R_4 = 60 \text{ Ом}; R_5 = 20 \text{ Ом}$</p>	1.2.9	 <p>$u_{01} = 60 \text{ В}; i_{04} = 0,9 \text{ А};$ $R_1 = R_5 = 200 \text{ Ом};$ $R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом}$</p>
1.2.10	 <p>$u_{02} = 20 \text{ В}; i_{06} = 0,5 \text{ А};$ $R_1 = R_4 = 100 \text{ Ом};$ $R_3 = R_5 = 50 \text{ Ом}$</p>	1.2.11	 <p>$u_{01} = 7,2 \text{ В}; i_{05} = 90 \text{ mA};$ $R_2 = R_3 = R_6 = 100 \text{ Ом};$ $R_4 = 300 \text{ Ом}$</p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.2.12	 <p>$u_{05} = 10 \text{ В}; i_{02} = 0,3 \text{ А};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 100 \text{ Ом}$</p>	1.2.13	 <p>$u_{06} = 20 \text{ В}; i_{04} = 0,7 \text{ А};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = 100 \text{ Ом}$</p>
1.2.14	 <p>$u_{01} = 15 \text{ В}; i_{05} = 0,6 \text{ А};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 100 \text{ Ом}$</p>	1.2.15	 <p>$u_{06} = 15 \text{ В}; i_{02} = 0,3 \text{ А};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 200 \text{ Ом}$</p>
1.2.16	 <p>$u_{06} = 10 \text{ В}; i_{04} = 400 \text{ mA};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = 100 \text{ Ом}$</p>	1.2.17	 <p>$u_{01} = 12 \text{ В}; i_{05} = 80 \text{ mA};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 300 \text{ Ом}$</p>
1.2.18	 <p>$u_{01} = 24 \text{ В}; i_{05} = 60 \text{ mA};$ $R_1 = R_4 = 200 \text{ Ом};$ $R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом}$</p>	1.2.19	 <p>$u_{03} = 27 \text{ В}; i_{02} = 270 \text{ mA};$ $R_1 = R_4 = R_6 = 300 \text{ Ом};$ $R_5 = 900 \text{ Ом}$</p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.2.20	 <p> $u_{01} = 10 \text{ В}; i_{06} = 200 \text{ мА};$ $R_2 = 600 \text{ Ом}; R_3 = 200 \text{ Ом};$ $R_4 = 400 \text{ Ом}; R_5 = 800 \text{ Ом}$ </p>	1.2.21	 <p> $u_{04} = 50 \text{ В}; i_{01} = 0,8 \text{ А};$ $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}; R_3 = 500 \text{ Ом};$ $R_5 = 400 \text{ Ом}$ </p>
1.2.22	 <p> $u_{01} = 45 \text{ В}; i_{05} = 0,3 \text{ А};$ $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом};$ $R_3 = R_4 = 50 \text{ Ом}$ </p>	1.2.23	 <p> $u_{01} = 12 \text{ В}; i_{06} = 0,6 \text{ А};$ $R_3 = 100 \text{ Ом}; R_2 = R_5 = 400 \text{ Ом};$ $R_4 = 300 \text{ Ом}$ </p>
1.2.24	 <p> $u_{01} = 15 \text{ В}; i_{04} = 0,3 \text{ А};$ $R_2 = 300 \text{ Ом};$ $R_3 = R_5 = R_6 = 100 \text{ Ом}$ </p>	1.2.25	 <p> $u_{05} = 18 \text{ В}; i_{06} = 240 \text{ мА};$ $R_1 = R_3 = 400 \text{ Ом}; R_2 = 300 \text{ Ом};$ $R_4 = 100 \text{ Ом}$ </p>

1.3. Метод токов ветвей

[1, с. 57–59; 2, с. 41–43]

Метод анализа колебаний в электрических цепях, в котором переменными системы уравнений анализируемой цепи являются токи в ветвях цепи, называется методом токов ветвей. Метод основан на применении законов Кирхгофа.

В задачах 1.3.0–1.3.25 для определения неизвестных токов во всех ветвях заданной цепи методом токов ветвей (методом уравнений Кирхгофа) рекомендуется следующая последовательность действий:

- определите число независимых уравнений по первому закону Кирхгофа – $N_I = N_y - 1$; и по второму закону Кирхгофа – $N_{II} = N_B - N_y + 1 - N_{ист.т}$. Сделайте проверку – $N = N_I + N_{II} = N_B - N_{ист.т}$, где N_B – число ветвей, N_y – число узлов, $N_{ист.т}$ – число источников тока в схеме цепи;
- покажите произвольно положительные направления токов в ветвях и составьте уравнения по первому закону Кирхгофа;
- покажите произвольно положительные направления обхода выбранных контуров и составьте уравнения по второму закону Кирхгофа.

Таблица 1.3

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.3.0		1.3.1	

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.3.2		1.3.3	
1.3.4		1.3.5	
1.3.6		1.3.7	
1.3.8		1.3.9	

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.3.10		1.3.11	
1.3.12		1.3.13	
1.3.14		1.3.15	
1.3.16		1.3.17	

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.3.18		1.3.19	
1.3.20		1.3.21	
1.3.22		1.3.23	
1.3.24		1.3.25	

1.4. Метод узловых напряжений

[1, с. 63–68; 2, с. 53–57]

Метод анализа колебаний в электрических цепях, в которых переменными системы уравнений анализируемой цепи выбраны узловые напряжения, называется методом узловых напряжений.

Узловые напряжения – это напряжения во всех узлах цепи, отсчитанные относительно некоторого одного базисного (опорного) узла, потенциал которого принимается равным нулю.

Применение метода узловых напряжений позволяет существенно уменьшить число решаемых уравнений по сравнению с методом токов ветвей.

По найденным узловым напряжениям токи ветвей анализируемой цепи рассчитываются по закону Ома (рис. 1.4.1).

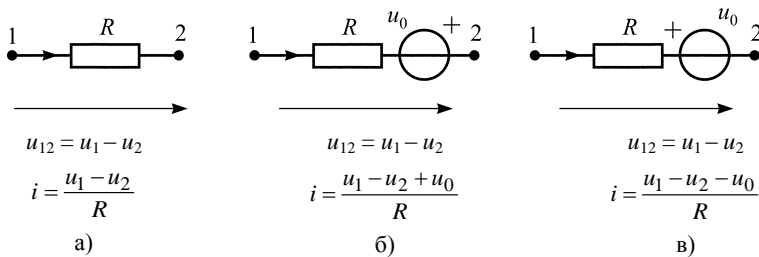


Рис. 1.4.1. Виды ветвей в ЭЦ:

а – ветвь R ; б – ветвь R, u_0 при согласном выборе положительных направлений i, u_0 ;
 в – ветвь R, u_0 при встречном выборе положительных направлений i, u_0

Для резистивных цепей, содержащих только независимые источники тока, базисный узел выбирается произвольно.

В этом случае число узловых напряжений, а значит, и порядок канонической системы узловых уравнений, определяется по формуле:

$$N = N_y - 1.$$

Для резистивных цепей, содержащих не только независимые источники тока, но и независимые источники напряжения, в качестве базисного узла выбирается тот узел, к которому подключен зажим источника напряжения со знаком «–», тогда узловое напряжение узла, к которому подключен другой зажим источника, известен и равен его задающему напряжению со знаком «+».

1.4.1. Метод узловых напряжений в резистивных цепях с источниками тока

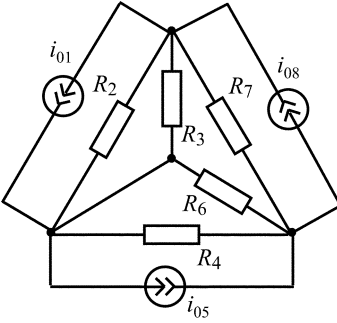
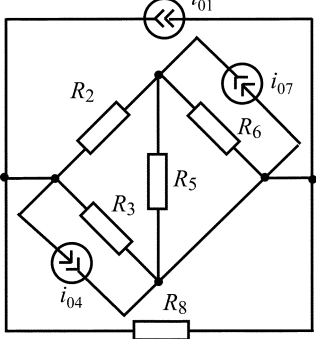
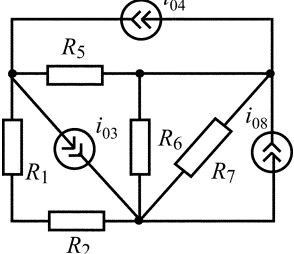
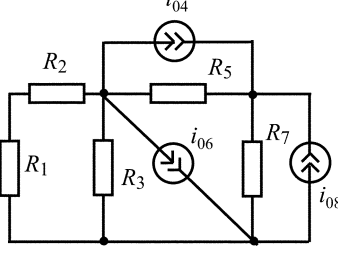
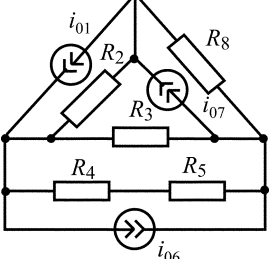
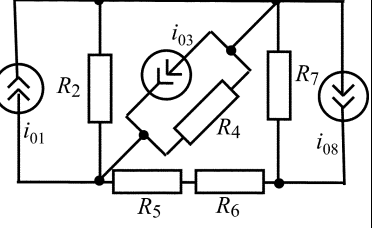
В задачах 1.4.1.0–1.4.1.25 при расчете токов в ветвях заданной цепи методом узловых напряжений рекомендуется следующая последовательность действий:

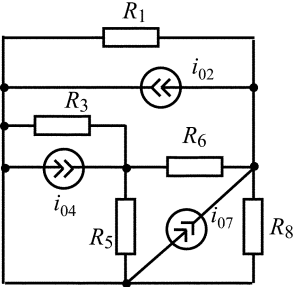
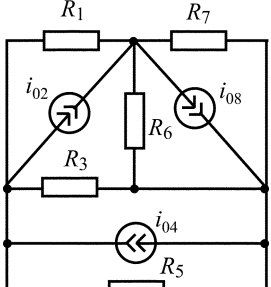
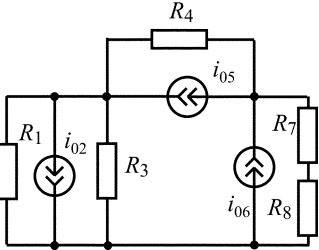
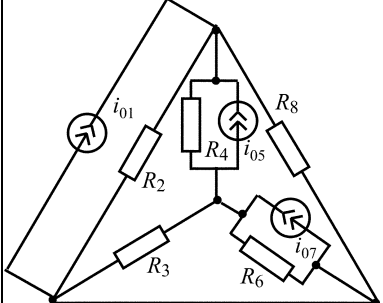
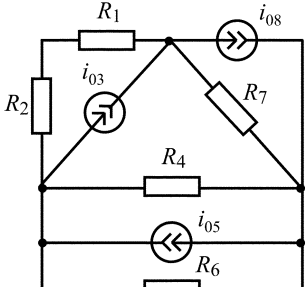
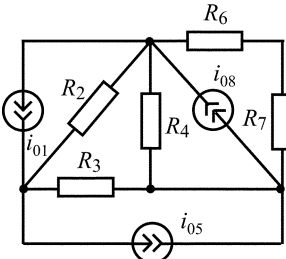
- выберите произвольно базисный (опорный) узел и приравняйте его потенциал нулю, пронумеруйте остальные узлы;
- составьте каноническую систему узловых уравнений и выразите ее коэффициенты через параметры заданной цепи;
- рассчитайте значения узловых напряжений, решив полученную систему уравнений;
- найдите токи в ветвях через узловые напряжения;
- сделайте проверку правильности расчета цепи с помощью первого и второго законов Кирхгофа.

Таблица 1.4.1

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.1.0	<p> $i_{01} = 5 \text{ mA}; i_{05} = 1 \text{ mA}; i_{07} = 6 \text{ mA};$ $R_2 = R_3 = R_6 = 0,5 \text{ кОм};$ $R_4 = R_8 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.4.1.1	<p> $i_{01} = 0,1 \text{ A}; i_{04} = 0,2 \text{ A}; i_{06} = 0,6 \text{ A};$ $R_2 = R_3 = R_5 = 20 \text{ Ом};$ $R_7 = R_8 = 10 \text{ Ом}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.1.2	<p>$i_{01} = 5 \text{ mA}; i_{03} = 2 \text{ mA}; i_{06} = 3 \text{ mA};$ $R_2 = R_4 = R_5 = R_7 = R_8 = 1 \text{ k}\Omega$</p>	1.4.1.3	<p>$i_{01} = 100 \text{ mA}; i_{02} = 50 \text{ mA};$ $i_{07} = 10 \text{ mA};$ $R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_8 = 100 \text{ }\Omega$</p>
1.4.1.4	<p>$i_{01} = i_{08} = 2 \text{ mA}; i_{03} = 3 \text{ mA};$ $R_2 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 2 \text{ k}\Omega$</p>	1.4.1.5	<p>$i_{02} = 60 \text{ mA}; i_{03} = 20 \text{ mA};$ $i_{08} = 100 \text{ mA};$ $R_1 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 1 \text{ k}\Omega$</p>
1.4.1.6	<p>$i_{01} = 3 \text{ mA}; i_{03} = 9 \text{ mA}; i_{07} = 1 \text{ mA};$ $R_2 = R_4 = R_5 = 1 \text{ k}\Omega;$ $R_6 = R_8 = 2 \text{ k}\Omega$</p>	1.4.1.7	<p>$i_{04} = 6 \text{ mA}; i_{06} = 2 \text{ mA}; i_{08} = 1 \text{ mA};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = R_7 = 2 \text{ k}\Omega$</p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.1.8	 <p data-bbox="213 587 542 667"> $i_{01} = 1 \text{ mA}; i_{05} = 2 \text{ mA}; i_{08} = 4 \text{ mA};$ $R_2 = R_4 = R_6 = 1 \text{ кОМ};$ $R_3 = R_7 = 0,5 \text{ кОМ}$ </p>	1.4.1.9	 <p data-bbox="680 603 997 651"> $i_{01} = 600 \text{ mA}; i_{04} = i_{07} = 100 \text{ mA};$ $R_2 = R_3 = R_5 = R_6 = R_8 = 100 \text{ Ом}$ </p>
1.4.1.10	 <p data-bbox="232 970 524 1050"> $i_{03} = 4 \text{ mA}; i_{04} = 10 \text{ mA};$ $i_{08} = 12 \text{ mA}; R_1 = R_2 = 1 \text{ кОМ};$ $R_5 = R_6 = R_7 = 2 \text{ кОМ}$ </p>	1.4.1.11	 <p data-bbox="692 970 983 1050"> $i_{04} = 10 \text{ mA}; i_{06} = i_{08} = 20 \text{ mA};$ $R_1 = R_2 = 0,5 \text{ кОМ};$ $R_3 = R_5 = R_7 = 1 \text{ кОМ}$ </p>
1.4.1.12	 <p data-bbox="221 1353 538 1433"> $i_{01} = 10 \text{ mA}; i_{06} = 2 \text{ mA};$ $i_{07} = 9 \text{ mA}; R_2 = R_3 = R_8 = 1 \text{ кОМ};$ $R_4 = R_5 = 0,5 \text{ кОМ}$ </p>	1.4.1.13	 <p data-bbox="703 1353 983 1433"> $i_{01} = 10 \text{ mA}; i_{03} = i_{08} = 5 \text{ mA};$ $R_2 = R_4 = R_7 = 2 \text{ кОМ};$ $R_5 = R_6 = 1 \text{ кОМ}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.1.14	 <p>$i_{02} = i_{04} = 25 \text{ mA}; i_{07} = 30 \text{ mA};$ $R_1 = R_3 = R_5 = R_6 = R_8 = 200 \text{ Ом}$</p>	1.4.1.15	 <p>$i_{02} = 40 \text{ mA}; i_{04} = 140 \text{ mA};$ $i_{08} = 20 \text{ mA};$ $R_1 = R_3 = R_5 = R_6 = R_7 = 1 \text{ кОм}$</p>
1.4.1.16	 <p>$i_{02} = 20 \text{ mA}; i_{05} = 40 \text{ mA};$ $i_{06} = 80 \text{ mA};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_7 = R_8 = 1 \text{ кОм}$</p>	1.4.1.17	 <p>$i_{01} = i_{05} = 5 \text{ mA}; i_{07} = 7 \text{ mA};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_8 = 1 \text{ кОм}$</p>
1.4.1.18	 <p>$i_{03} = 60 \text{ mA}; i_{05} = 70 \text{ mA};$ $i_{08} = 20 \text{ mA};$ $R_1 = R_2 = R_4 = R_6 = R_7 = 1 \text{ кОм}$</p>	1.4.1.19	 <p>$i_{01} = 40 \text{ mA}; i_{05} = 20 \text{ mA};$ $i_{08} = 50 \text{ mA};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = 1 \text{ кОм}$</p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.1.20	<p>$i_{04} = 15 \text{ mA}; i_{05} = 30 \text{ mA}; i_{08} = 12 \text{ mA};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = R_7 = 1 \text{ кОм}$</p>	1.4.1.21	<p>$i_{02} = 30 \text{ mA}; i_{04} = 12 \text{ mA}; i_{06} = 20 \text{ mA};$ $R_1 = R_3 = R_5 = R_7 = R_8 = 1 \text{ кОм}$</p>
1.4.1.22	<p>$i_{01} = i_{06} = 5 \text{ mA}; i_{08} = 22 \text{ mA};$ $R_2 = R_4 = R_5 = R_7 = 1 \text{ кОм};$ $R_3 = 2 \text{ кОм}$</p>	1.4.1.23	<p>$i_{02} = 20 \text{ mA}; i_{04} = i_{06} = 6 \text{ mA};$ $R_1 = R_3 = R_5 = R_7 = R_8 = 1 \text{ кОм}$</p>
1.4.1.24	<p>$i_{04} = 20 \text{ mA}; i_{05} = 34 \text{ mA};$ $i_{08} = 10 \text{ mA};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = R_7 = 1 \text{ кОм}$</p>	1.4.1.25	<p>$i_{02} = 35 \text{ mA}; i_{05} = 10 \text{ mA}; i_{07} = 5 \text{ mA};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = R_8 = 1 \text{ кОм}$</p>

1.4.2. Метод узловых напряжений в резистивных цепях с источниками тока и с источниками напряжения

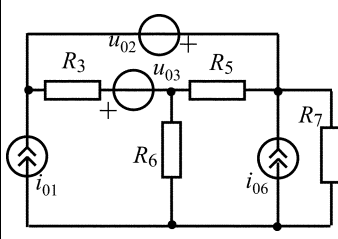
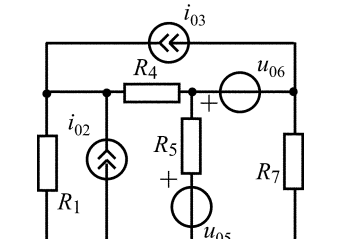
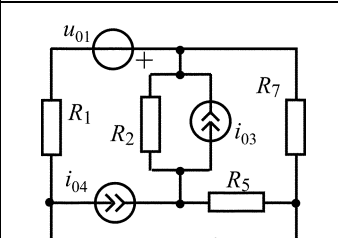
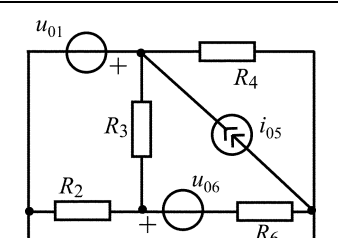
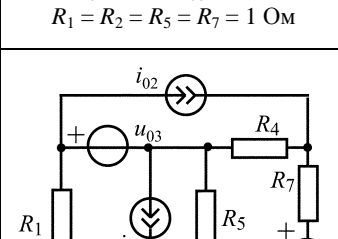
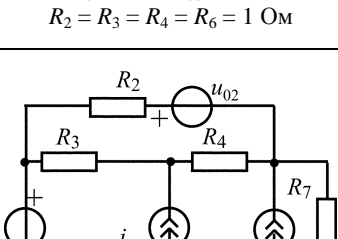
В задачах 1.4.2.0–1.4.2.25 при расчете токов в ветвях заданной цепи методом узловых напряжений рекомендуется следующая последовательность действий:

- выберите базисный (опорный) узел и приравняйте его потенциал нулю. Обратите внимание, что в схеме цепи есть источники напряжения. Пронумеруйте остальные узлы;
- составьте каноническую систему узловых уравнений и выразите ее коэффициенты через параметры заданной цепи;
- рассчитайте значения узловых напряжений, решив полученную систему уравнений;
- найдите токи в ветвях через узловые напряжения;
- сделайте проверку правильности расчета цепи с помощью первого и второго законов Кирхгофа.

Таблица 1.4.2

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.2.0	<p> $i_{02} = 3 \text{ мА}; i_{05} = 4 \text{ мА};$ $u_{01} = u_{06} = 2 \text{ В};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_7 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.4.2.1	<p> $i_{01} = 6 \text{ мА}; i_{03} = 2 \text{ мА};$ $u_{04} = 2 \text{ В}; u_{07} = 4 \text{ В};$ $R_2 = R_4 = R_5 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>

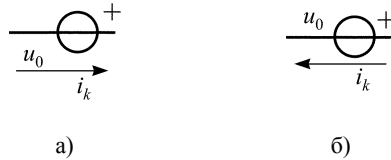
Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.2.2	<p> $i_{02} = i_{07} = 2 \text{ A};$ $u_{01} = 8 \text{ B}; u_{05} = 3 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.4.2.3	<p> $i_{01} = 2 \text{ A}; i_{04} = 3 \text{ A};$ $u_{05} = u_{07} = 5 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_6 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.4.2.4	<p> $i_{01} = 5 \text{ A}; i_{03} = 1 \text{ A};$ $u_{02} = 2 \text{ B}; u_{07} = 5 \text{ B};$ $R_2 = R_4 = R_5 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.4.2.5	<p> $i_{01} = 1 \text{ A}; i_{05} = 2 \text{ A};$ $u_{02} = 5 \text{ B}; u_{07} = 8 \text{ B};$ $R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.4.2.6	<p> $i_{04} = 3 \text{ mA}; i_{07} = 1 \text{ mA};$ $u_{01} = 4 \text{ B}; u_{03} = 1 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_5 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.4.2.7	<p> $i_{01} = 2 \text{ A}; i_{02} = 6 \text{ A};$ $u_{04} = 3 \text{ B}; u_{06} = 2 \text{ B};$ $R_3 = R_5 = R_6 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.2.8	 <p> $i_{01} = i_{06} = 1 \text{ mA};$ $u_{02} = 7 \text{ B}; u_{03} = 2 \text{ B};$ $R_3 = R_4 = R_5 = R_7 = 1 \text{ кОМ}$ </p>	1.4.2.9	 <p> $i_{02} = 1 \text{ A}; i_{03} = 3 \text{ A};$ $u_{05} = 1 \text{ B}; u_{06} = 5 \text{ B};$ $R_1 = R_4 = R_5 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.4.2.10	 <p> $i_{03} = 3 \text{ A}; i_{04} = 1 \text{ A};$ $u_{01} = 6 \text{ B}; u_{06} = 3 \text{ B};$ $R_1 = R_2 = R_5 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.4.2.11	 <p> $i_{05} = 1 \text{ A}; i_{07} = 6 \text{ A};$ $u_{01} = 5 \text{ B}; u_{06} = 2 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.4.2.12	 <p> $i_{02} = i_{04} = 5 \text{ mA};$ $u_{03} = 10 \text{ B}; u_{07} = 5 \text{ B};$ $R_1 = R_5 = R_6 = R_7 = 1 \text{ кОМ}$ </p>	1.4.2.13	 <p> $i_{05} = 2 \text{ A}; i_{06} = 1 \text{ A};$ $u_{01} = 10 \text{ B}; u_{02} = 5 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.2.14	<p> $i_{03} = 9 \text{ mA}; i_{07} = 1 \text{ mA};$ $u_{02} = 2 \text{ B}; u_{06} = 8 \text{ B};$ $R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.4.2.15	<p> $i_{03} = 7 \text{ A}; i_{06} = 2 \text{ A};$ $u_{01} = 10 \text{ B}; u_{05} = 1 \text{ B};$ $R_2 = R_4 = R_5 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.4.2.16	<p> $i_{01} = 5 \text{ A}; i_{06} = 3 \text{ A};$ $u_{05} = 2 \text{ B}; u_{07} = 4 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.4.2.17	<p> $i_{02} = 5 \text{ mA}; i_{06} = 3 \text{ mA};$ $u_{04} = 9 \text{ B}; u_{05} = 4 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_7 = 1 \text{ кОм}$ </p>
1.4.2.18	<p> $i_{01} = 2 \text{ A}; i_{07} = 11 \text{ A};$ $u_{04} = 1 \text{ B}; u_{05} = 6 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.4.2.19	<p> $i_{05} = 7 \text{ A}; i_{07} = 1 \text{ A};$ $u_{02} = 10 \text{ B}; u_{04} = 2 \text{ B};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.4.2.20	<p> $i_{02} = 3 \text{ A}; i_{05} = 7 \text{ A};$ $u_{01} = 8 \text{ B}; u_{07} = 4 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.4.2.21	<p> $i_{01} = 13 \text{ mA}; i_{03} = 2 \text{ mA};$ $u_{04} = u_{07} = 1 \text{ B};$ $R_2 = R_4 = R_5 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>
1.4.2.22	<p> $i_{03} = 4 \text{ A}; i_{05} = 3 \text{ A};$ $u_{01} = 6 \text{ B}; u_{07} = 8 \text{ B};$ $R_2 = R_4 = R_6 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.4.2.23	<p> $i_{01} = 2 \text{ A}; i_{05} = 4 \text{ A};$ $u_{02} = 5 \text{ B}; u_{07} = 3 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.4.2.24	<p> $i_{02} = 1 \text{ A}; i_{05} = 4 \text{ A};$ $u_{01} = 10 \text{ B}; u_{03} = 4 \text{ B};$ $R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.4.2.25	<p> $i_{05} = 2 \text{ A}; i_{07} = 15 \text{ A};$ $u_{01} = 3 \text{ B}; u_{04} = 4 \text{ B};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>

u_{kk} – контурное задающее напряжение k -го контура, равное алгебраической сумме задающих напряжений источников напряжения всех ветвей k -го контура, при этом в сумму со знаком «+» входят задающие напряжения тех источников, у которых контурный ток k -го контура оказывается ориентированным от зажимов источников, помеченных знаком «+» (а), и со знаком «-» (б) – в противном случае.



Метод контурных токов можно применять, когда в цепи, помимо независимых, имеются зависимые источники.

В задачах 1.5.0–1.5.25 при расчете токов в ветвях заданной цепи методом контурных токов рекомендуется следующая последовательность действий:

- выберите независимые контуры и покажите положительные направления контурных токов в них. Обратите внимание, что в схеме цепи есть источники тока. Пронумеруйте контурные токи;
- составьте каноническую систему контурных уравнений и выразите ее коэффициенты через параметры заданной цепи;
- рассчитайте значения контурных токов, решив полученную систему уравнений;
- найдите токи ветвей через контурные токи.

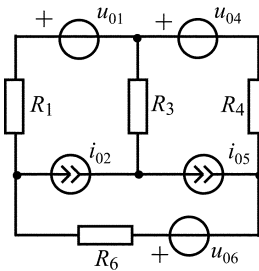
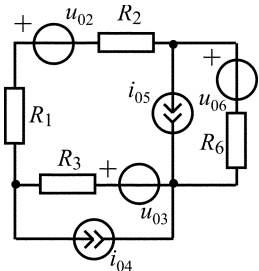
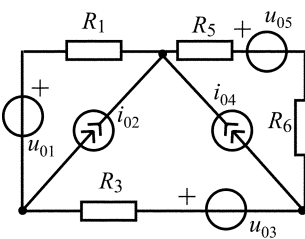
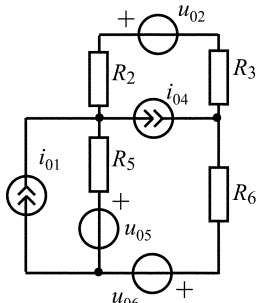
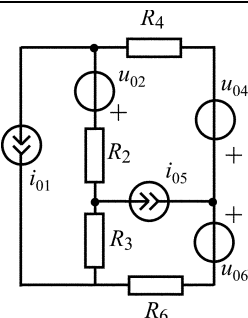
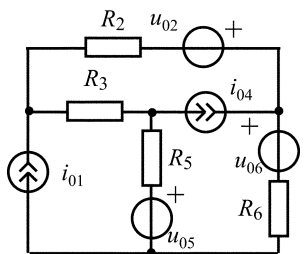
Таблица 1.5

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.5.0	<p> $i_{02} = 1 \text{ mA}; i_{05} = 3 \text{ mA};$ $u_{01} = 3 \text{ B}; u_{04} = 24 \text{ B}; u_{06} = 1 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.5.1	<p> $i_{01} = 3 \text{ mA}; i_{05} = 8 \text{ mA};$ $u_{02} = 10 \text{ B}; u_{03} = 2 \text{ B}; u_{05} = 5 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.5.2	<p> $i_{02} = 1 \text{ mA}; i_{03} = 2 \text{ mA};$ $u_{01} = 4 \text{ B}; u_{04} = 1 \text{ B}; u_{06} = 28 \text{ B};$ $R_1 = R_4 = R_5 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.5.3	<p> $i_{01} = 4 \text{ A}; i_{06} = 1 \text{ A};$ $u_{02} = 10 \text{ B}; u_{04} = 3 \text{ B}; u_{05} = 8 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.5.4	<p> $i_{01} = 3 \text{ mA}; i_{06} = 2 \text{ mA};$ $u_{02} = 4 \text{ B}; u_{03} = 6 \text{ B}; u_{05} = 12 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.5.5	<p> $i_{02} = 1 \text{ A}; i_{06} = 2 \text{ A};$ $u_{01} = 28 \text{ B}; u_{04} = 2 \text{ B}; u_{05} = 3 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.5.6	<p> $i_{03} = 4 \text{ A}; i_{06} = 3 \text{ A};$ $u_{01} = 3 \text{ B}; u_{02} = 5 \text{ B}; u_{05} = 9 \text{ B};$ $R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.5.7	<p> $i_{02} = 2 \text{ mA}; i_{03} = 5 \text{ mA};$ $u_{01} = 1 \text{ B}; u_{04} = 16 \text{ B}; u_{06} = 10 \text{ B};$ $R_1 = R_4 = R_5 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.5.8	<p> $i_{01} = 10 \text{ mA}; i_{05} = 8 \text{ mA};$ $u_{03} = 6 \text{ B}; u_{04} = 10 \text{ B}; u_{06} = 14 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.5.9	<p> $i_{01} = 5 \text{ A}; i_{04} = 3 \text{ A};$ $u_{02} = 20 \text{ B}; u_{03} = 12 \text{ B}; u_{05} = 7 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_5 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.5.10	<p> $i_{02} = 3 \text{ A}; i_{06} = 1 \text{ A};$ $u_{01} = 2 \text{ B}; u_{03} = 16 \text{ B}; u_{04} = 4 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.5.11	<p> $i_{01} = 12 \text{ mA}; i_{05} = 8 \text{ mA};$ $u_{02} = 20 \text{ B}; u_{03} = 16 \text{ B}; u_{06} = 4 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>
1.5.12	<p> $i_{01} = 3 \text{ A}; i_{06} = 5 \text{ A};$ $u_{03} = 10 \text{ B}; u_{04} = 4 \text{ B}; u_{05} = 8 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.5.13	<p> $i_{01} = 2 \text{ mA}; i_{06} = 1 \text{ mA};$ $u_{02} = 3 \text{ B}; u_{03} = 34 \text{ B}; u_{05} = 2 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ кОм}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.5.14	<p> $i_{01} = 2 \text{ mA}; i_{02} = 6 \text{ mA};$ $u_{04} = 1 \text{ B}; u_{03} = 4 \text{ B}; u_{06} = 21 \text{ B};$ $R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 1 \text{ kOM}$ </p>	1.5.15	<p> $i_{04} = 2 \text{ A}; i_{06} = 3 \text{ A};$ $u_{01} = 2 \text{ B}; u_{02} = 4 \text{ B}; u_{03} = 8 \text{ B};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = 1 \text{ OM}$ </p>
1.5.16	<p> $i_{02} = 7 \text{ A}; i_{06} = 4 \text{ A};$ $u_{01} = 14 \text{ B}; u_{03} = 3 \text{ B}; u_{05} = 8 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ OM}$ </p>	1.5.17	<p> $i_{04} = 8 \text{ mA}; i_{05} = 10 \text{ mA};$ $u_{01} = 40 \text{ B}; u_{02} = u_{06} = 2 \text{ B};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = 1 \text{ kOM}$ </p>
1.5.18	<p> $i_{02} = 3 \text{ A}; i_{06} = 5 \text{ A};$ $u_{01} = 30 \text{ B}; u_{03} = 4 \text{ B}; u_{05} = 2 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = 1 \text{ OM}$ </p>	1.5.19	<p> $i_{02} = 6 \text{ A}; i_{05} = 1 \text{ A};$ $u_{01} = 3 \text{ B}; u_{04} = 16 \text{ B}; u_{06} = 10 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ OM}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.5.20	 <p> $i_{02} = 15 \text{ mA}; i_{05} = 8 \text{ mA};$ $u_{01} = 30 \text{ B}; u_{04} = 16 \text{ B}; u_{06} = 2 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.5.21	 <p> $i_{04} = 2 \text{ mA}; i_{05} = 6 \text{ mA};$ $u_{02} = 18 \text{ B}; u_{03} = 2 \text{ B}; u_{06} = 20 \text{ B};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>
1.5.22	 <p> $i_{02} = 1 \text{ A}; i_{04} = 5 \text{ A};$ $u_{01} = 14 \text{ B}; u_{03} = 10 \text{ B}; u_{05} = 3 \text{ B};$ $R_1 = R_3 = R_5 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>	1.5.23	 <p> $i_{01} = 1 \text{ A}; i_{04} = 2 \text{ A};$ $u_{02} = 5 \text{ B}; u_{05} = 4 \text{ B}; u_{06} = 20 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_5 = R_6 = 1 \text{ Ом}$ </p>
1.5.24	 <p> $i_{01} = 6 \text{ mA}; i_{05} = 2 \text{ mA};$ $u_{02} = 3 \text{ B}; u_{04} = 25 \text{ B}; u_{06} = 2 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.5.25	 <p> $i_{01} = 1 \text{ mA}; i_{04} = 7 \text{ mA}; u_{02} = 17 \text{ B};$ $u_{05} = 15 \text{ B}; u_{06} = 8 \text{ B};$ $R_2 = R_3 = R_5 = R_6 = 1 \text{ кОм}$ </p>

1.6. Метод эквивалентного генератора

[1, с. 41–44; 2, с. 57–60]

Метод эквивалентного генератора основан на теореме об эквивалентном генераторе и применяется для анализа электрических цепей, в которых требуется найти ток в одной пассивной ветви (нагрузке). Тогда цепь, внешняя по отношению к нагрузке, рассматривается как эквивалентный генератор напряжения (рис. 1.6, а) или как эквивалентный генератор тока (рис. 1.6, б).

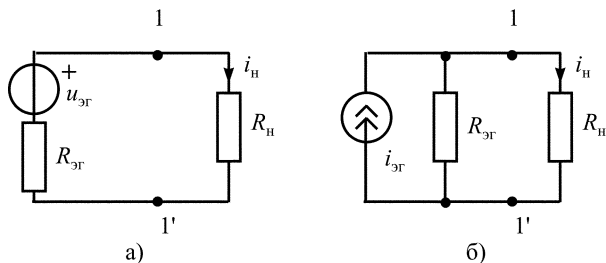


Рис. 1.6

Эквивалентный генератор – это активный линейный двухполюсник, параметры которого определяются так:

$u_{эГ}$ – задающее напряжение генератора равно напряжению холостого хода ($u_{хх}$) на разомкнутых зажимах (1, 1') активного двухполюсника;

$i_{эГ}$ – задающий ток генератора равен току короткого замыкания ($i_{кз}$), проходящего через замкнутые накоротко зажимы (1, 1') активного двухполюсника;

$R_{эГ}$ – внутреннее сопротивление генератора равно эквивалентному входному сопротивлению, рассчитанному относительно разомкнутых зажимов (1, 1') пассивного двухполюсника, который получен из активного путем замены всех источников напряжения их внутренними сопротивлениями ($R_i = 0$), а всех источников тока – ($R_i = \infty$).

После определения параметров эквивалентного генератора рассчитывается ток в нагрузке по закону Ома:

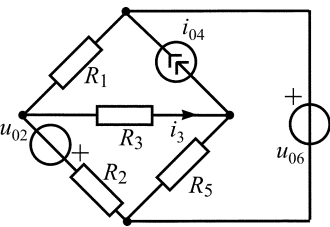
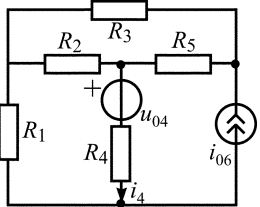
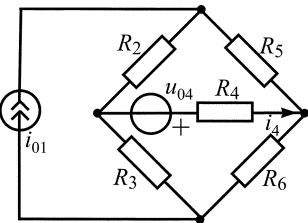
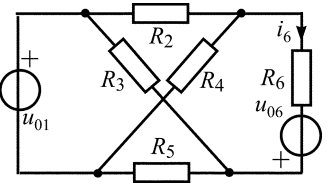
$$i_Н = \frac{u_{эГ}}{R_{эГ} + R_Н}, \quad u_{эГ} = u_{хх} \quad (\text{рис. 1.6, а})$$

$$i_Н = i_{эГ} \frac{R_{эГ}}{R_{эГ} + R_Н}, \quad i_{эГ} = i_{кз} \quad (\text{рис. 1.6, б})$$

В задачах 1.6.0–1.6.25 для расчета тока в ветви, указанного стрелкой на схеме заданной цепи, методом эквивалентного генератора рекомендуется следующая последовательность действий:

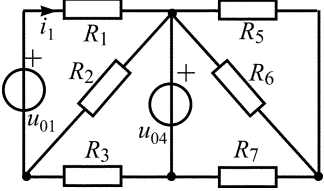
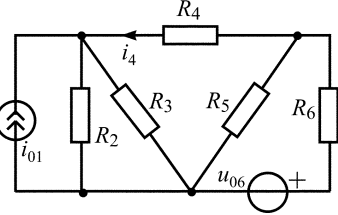
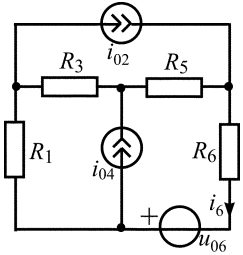
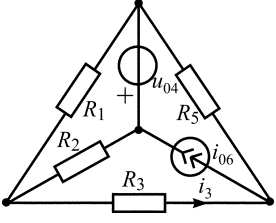
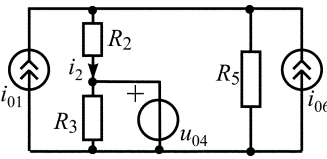
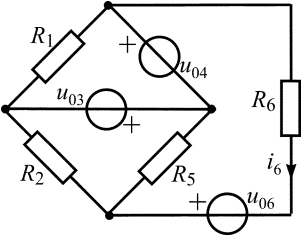
- нарисуйте схему эквивалентного генератора напряжения (рис. 1.6, а), заменив R_H сопротивлением в указанной ветви;
- рассчитайте по второму закону Кирхгофа напряжение $u_{ХХ} = u_{ЭГ}$, исключив резистивное сопротивление в указанной ветви и выбрав положительное направление $u_{ХХ}$, совпадающее с направлением искомого тока;
- рассчитайте сопротивление $R_{ЭГ}$ относительно разомкнутых зажимов ветви, заменив в оставшейся цепи все источники их внутренними сопротивлениями;
- рассчитайте искомый ток в ветви по закону Ома (рис.1.6, а).

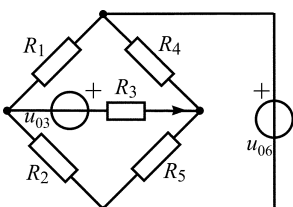
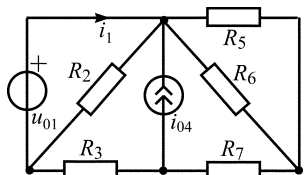
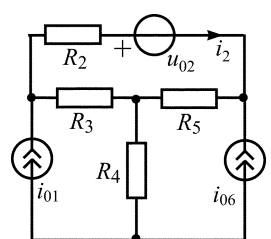
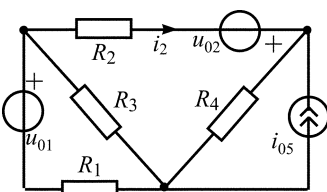
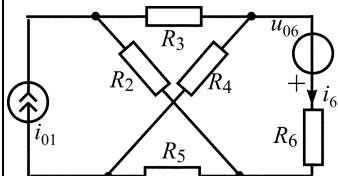
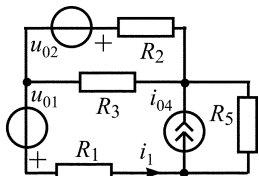
Таблица 1.6

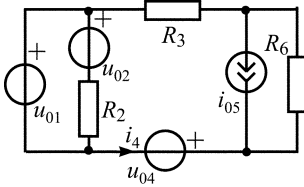
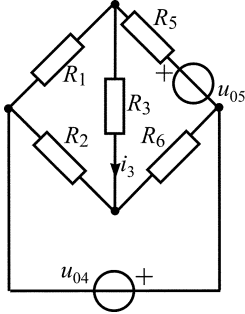
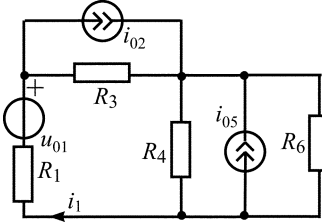
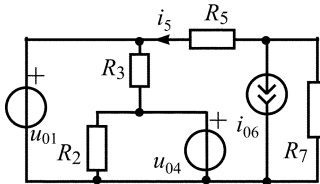
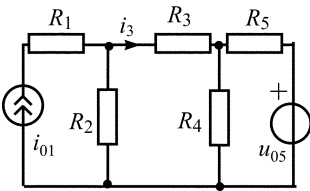
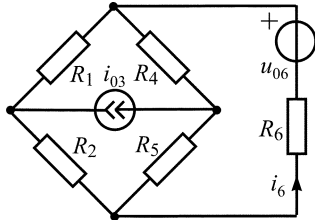
Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.6.0	 <p> $u_{02} = u_{06} = 1 \text{ В}; i_{04} = 1 \text{ мА};$ $R_1 = R_2 = 2 \text{ кОм}; R_3 = 0,5 \text{ кОм};$ $R_5 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.6.1	 <p> $u_{04} = 60 \text{ В}; i_{06} = 10 \text{ мА};$ $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}; R_3 = 6 \text{ кОм};$ $R_4 = 20 \text{ кОм}; R_5 = 4 \text{ кОм}$ </p>
1.6.2	 <p> $u_{04} = 13 \text{ В}; i_{01} = 10 \text{ мА};$ $R_2 = 4 \text{ кОм}; R_3 = 3 \text{ кОм};$ $R_4 = 1,5 \text{ кОм}; R_5 = 1 \text{ кОм};$ </p>	1.6.3	 <p> $u_{01} = 50 \text{ В}; u_{06} = 30 \text{ В};$ $R_2 = R_5 = 20 \text{ Ом}; R_3 = R_4 = 30 \text{ Ом};$ $R_6 = 16 \text{ Ом}$ </p>

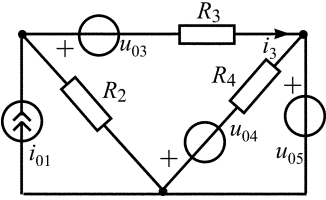
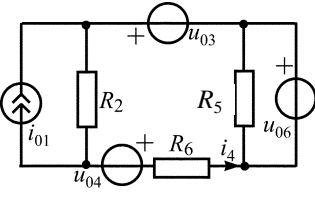
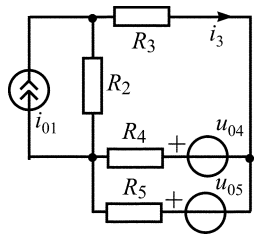
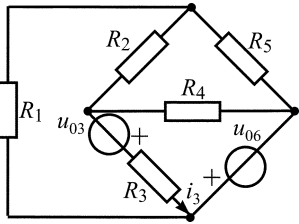
$$R_6 = 2 \text{ кОм}$$

Продолжение табл. 1.6

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.6.4	 <p> $u_{01} = 26 \text{ В}; u_{04} = 16 \text{ В};$ $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = R_6 = R_7 =$ $= 4 \text{ кОм}$ </p>	1.6.5	 <p> $u_{06} = 20 \text{ В}; i_{01} = 10 \text{ МА};$ $R_2 = 4 \text{ кОм}; R_3 = 6 \text{ кОм};$ $R_4 = 1 \text{ кОм}; R_5 = 2 \text{ кОм};$ $R_6 = 8 \text{ кОм}$ </p>
1.6.6	 <p> $u_{06} = 2 \text{ В}; i_{02} = 2 \text{ МА};$ $i_{04} = 1 \text{ МА}; R_1 = R_6 = 2 \text{ кОм};$ $R_3 = 4 \text{ кОм}; R_5 = 6 \text{ кОм}$ </p>	1.6.7	 <p> $u_{04} = 60 \text{ В}; i_{06} = 18 \text{ МА};$ $R_1 = R_2 = 4 \text{ кОм};$ $R_3 = R_5 = 2 \text{ кОм}$ </p>
1.6.8	 <p> $u_{04} = 12 \text{ В}; i_{01} = 18 \text{ МА};$ $i_{06} = 8 \text{ МА};$ $R_2 = R_3 = R_5 = 1 \text{ кОм}$ </p>	1.6.9	 <p> $u_{03} = u_{04} = u_{06} = 20 \text{ В};$ $R_1 = R_6 = 1 \text{ кОм};$ $R_2 = R_5 = 2 \text{ кОм}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.6.10	 <p> $u_{03} = u_{06} = 10 \text{ В};$ $R_1 = R_2 = R_3 = 2 \text{ кОМ};$ $R_4 = R_5 = 4 \text{ кОМ}$ </p>	1.6.11	 <p> $u_{01} = 100 \text{ В}; i_{04} = 20 \text{ мА};$ $R_2 = 10 \text{ кОМ}; R_3 = R_7 = 3 \text{ кОМ};$ $R_5 = R_6 = 8 \text{ кОМ}$ </p>
1.6.12	 <p> $u_{02} = 8 \text{ В}; i_{01} = 12 \text{ мА};$ $i_{06} = 8 \text{ мА};$ $R_2 = R_5 = 2 \text{ кОМ};$ $R_3 = R_4 = 4 \text{ кОМ}$ </p>	1.6.13	 <p> $u_{01} = 20 \text{ В}; u_{02} = 70 \text{ В};$ $i_{05} = 1 \text{ А};$ $R_2 = R_4 = 50 \text{ Ом};$ $R_1 = R_4 = 100 \text{ Ом}$ </p>
1.6.14	 <p> $u_{06} = 15 \text{ В}; i_{01} = 2 \text{ А};$ $R_3 = R_5 = 20 \text{ Ом};$ $R_2 = R_4 = 30 \text{ Ом}$ $R_6 = 25 \text{ Ом}$ </p>	1.6.15	 <p> $u_{01} = 30 \text{ В}; u_{02} = 32 \text{ В};$ $i_{04} = 2 \text{ мА}; R_1 = R_5 = 1 \text{ кОМ};$ $R_2 = R_3 = 4 \text{ кОМ}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
1.6.16	 <p style="text-align: center;"> $u_{01} = u_{02} = 12 \text{ В};$ $u_{04} = 36 \text{ В};$ $i_{05} = 2 \text{ мА};$ $R_2 = R_3 = R_6 = 4 \text{ кОм}$ </p>	1.6.17	 <p style="text-align: center;"> $u_{04} = 200 \text{ В}; u_{05} = 50 \text{ В};$ $R_1 = 2 \text{ кОм}; R_2 = 1 \text{ кОм};$ $R_3 = 8 \text{ кОм}; R_5 = 3 \text{ кОм};$ $R_6 = 4 \text{ кОм}$ </p>
1.6.18	 <p style="text-align: center;"> $u_{01} = 30 \text{ В}; i_{02} = 2 \text{ мА};$ $i_{05} = 5 \text{ мА}; R_1 = 1,6 \text{ кОм};$ $R_3 = 1 \text{ кОм}; R_4 = 4 \text{ кОм};$ $R_6 = 6 \text{ кОм}$ </p>	1.6.19	 <p style="text-align: center;"> $u_{01} = 2 \text{ В}; u_{04} = 1 \text{ В};$ $i_{06} = 2 \text{ мА};$ $R_2 = R_3 = R_5 = R_7 = 1 \text{ кОм}$ </p>
1.6.20	 <p style="text-align: center;"> $u_{05} = 1 \text{ В}; i_{01} = 2,5 \text{ мА};$ $R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = 1 \text{ кОм};$ $R_3 = 0,5 \text{ кОм}$ </p>	1.6.21	 <p style="text-align: center;"> $u_{06} = 10 \text{ В}; i_{03} = 9 \text{ мА};$ $R_1 = R_4 = R_6 = 2 \text{ кОм};$ $R_2 = R_5 = 4 \text{ кОм}$ </p>

<p>1.6.22</p>	 <p>$u_{03} = u_{04} = u_{05} = 4 \text{ В}; i_{01} = 5 \text{ мА};$ $R_2 = R_3 = R_4 = 2 \text{ кОм}$</p>	<p>1.6.23</p>	 <p>$u_{03} = u_{04} = u_{06} = 5 \text{ В}; i_{01} = 2 \text{ мА};$ $R_2 = R_4 = R_5 = 1 \text{ кОм}$</p>
<p>1.6.24</p>	 <p>$u_{04} = 10 \text{ В}; u_{05} = 20 \text{ В}; i_{01} = 15 \text{ мА};$ $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 2 \text{ кОм}$</p>	<p>1.6.25</p>	 <p>$u_{03} = 6 \text{ В}; u_{06} = 24 \text{ В};$ $R_1 = R_5 = 8 \text{ кОм}; R_2 = 2 \text{ кОм};$ $R_3 = 1 \text{ кОм}; R_4 = 6 \text{ кОм}$</p>

Контрольные вопросы

1. Какой элемент электрической цепи называют резистивным сопротивлением?
2. Какие элементы электрической цепи называют реактивными? В чем их отличительная особенность?
3. Как учитываются элементы индуктивности и емкости при расчете цепей в режиме постоянного тока?
4. Чем определяются запас энергии в индуктивности, в емкости?
5. Какие источники электромагнитной энергии называются независимыми?
6. Что называется источником напряжения, источником тока?
7. Когда два генератора можно считать эквивалентными? Как пересчитать генератор напряжения в эквивалентный ему генератор тока и наоборот?
8. Какое соединение элементов называется последовательным, какое – параллельным?
9. Сформулируйте первый закон Кирхгофа. Сколько независимых уравнений можно составить по первому закону Кирхгофа? Как выбираются знаки токов в уравнениях?

10. Сформулируйте второй закон Кирхгофа. Сколько независимых уравнений можно составить по второму закону Кирхгофа? Как в них выбираются знаки напряжений?

11. Относительно каких неизвестных составляются уравнения токов ветвей? Чему равно общее число этих уравнений?

12. Каков порядок анализа цепи методом токов ветвей?

13. Сформулируйте принцип наложения. Какие цепи подчиняются этому принципу?

14. Каков порядок анализа цепи методом наложения?

15. Как проверяется правильность расчета цепи с помощью баланса мощностей?

16. Относительно каких неизвестных составляются уравнения узловых напряжений? Что понимают под узловым напряжением k -го узла?

17. Запишите уравнения узловых напряжений в канонической форме.

18. Как рассчитывается собственная проводимость k -го узла G_{kk} ? Как рассчитывается проводимость G_{kl} между k -м и l -м узлами? Для каких цепей $G_{kl} = G_{lk}$?

19. Как составляются правые части уравнений узловых напряжений?

20. Как учитываются источники напряжения в уравнениях узловых напряжений?

21. Относительно каких неизвестных составляется уравнения контурных токов? Что понимают под контурным током k -го контура?

22. Запишите уравнения контурных токов в канонической форме.

23. Как рассчитывается собственное сопротивление k -го контура R_{kk} ? Как рассчитывается взаимное сопротивление R_{kl} общей ветви для k -го и l -го контуров и как определяется знак, с которым R_{kl} записывается в уравнение? Для каких цепей $R_{kl} = R_{lk}$?

24. Как составляются правые части уравнений контурных токов?

25. Как учитываются источники тока в уравнениях контурных токов?

26. В каких задачах целесообразно использовать метод эквивалентного генератора?

27. Как рассчитываются параметры эквивалентного генератора напряжения?

28. Как рассчитываются параметры эквивалентного генератора тока?

2. СИМВОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Мгновенные значения гармонических колебаний изменяются по закону

$$s(t) = S_m \cos(\omega t + \psi),$$

где S_m – амплитуда колебаний – наибольшее по абсолютному значению отклонение колеблющейся величины;

$\omega = 2\pi f = 2\pi / T$ – угловая частота колебаний – число циклов колебаний в интервале, равном 2π единицам времени;

T – период колебаний – наименьшее значение времени, после которого процесс полностью повторяется;

$f = 1/T$ – циклическая частота колебаний – число циклов колебаний в единицу времени;

ψ – начальная фаза колебаний, равна значению фазы колебаний $\Phi = \omega t + \psi$ в момент $t = 0$, может быть как положительной, так и отрицательной вещественной безразмерной величиной.

Для анализа режима гармонических колебаний в линейных электрических цепях (ЛЭЦ) используется символический метод (метод комплексных амплитуд), основанный на замене операций над косинусоидальными функциями, описывающими колебания, операциями над комплексными числами, содержащими полную информацию о параметрах колебаний. Тогда при условии, что в любой ЛЭЦ все гармонические колебания имеют одну и ту же известную частоту ω , мгновенное значение колебания $s(t) = S_m \cos(\omega t + \psi)$ можно заменить его комплексной амплитудой $\dot{S}_m = S_m e^{j\psi}$.

2.1. Комплексные сопротивления и проводимости пассивных двухполюсников

[1, с. 122–125; 2, с. 83–86]

Для линейного пассивного двухполюсника (рис. 2.1.1) в режиме гармонических колебаний мгновенные значения напряжения и тока на его входе имеют следующий вид:

$$\begin{cases} u = U_m \cos(\omega t + \psi_u), \\ i = I_m \cos(\omega t + \psi_i). \end{cases}$$

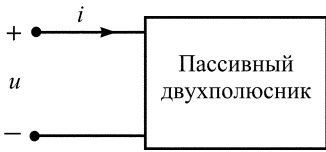


Рис. 2.1.1

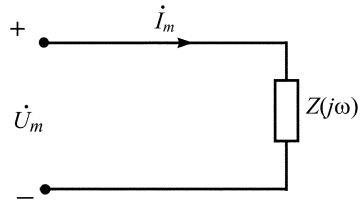


Рис. 2.1.2

При символическом методе анализа колебаний в пассивном двухполюснике (рис. 2.1.2) используются комплексные амплитуды напряжения $\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_u}$ и тока $\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}$. Отношение комплексных амплитуд напряжения и тока на входе двухполюсника называется комплексным сопротивлением двухполюсника и обозначается

$$Z(j\omega) = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{1}{Y(j\omega)},$$

где $Y(j\omega)$ – комплексная проводимость двухполюсника.

Для пассивных элементов R , L , C выполняются следующие соотношения между комплексными амплитудами колебаний напряжения и тока:

$$\begin{aligned} Z_R(j\omega) &= \frac{\dot{U}_{mR}}{\dot{I}_m} = R; & Y_R(j\omega) &= \frac{\dot{I}_m}{\dot{U}_{mR}} = \frac{1}{R} = G; \\ Z_L(j\omega) &= \frac{\dot{U}_{mL}}{\dot{I}_m} = j\omega L; & Y_L(j\omega) &= \frac{\dot{I}_m}{\dot{U}_{mL}} = \frac{1}{j\omega L} = -j \frac{1}{\omega L}; \\ Z_C(j\omega) &= \frac{\dot{U}_{mC}}{\dot{I}_m} = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C}; & Y_C(j\omega) &= \frac{\dot{I}_m}{\dot{U}_{mC}} = j\omega C. \end{aligned}$$

В задачах 2.1.0–2.1.7 рассчитайте комплексное сопротивление двухполюсника, если заданы мгновенные значения напряжения и тока на его входе. Нарисуйте схему и найдите параметры элементов простейшей последовательной цепи, имеющей такое комплексное сопротивление.

Таблица 2.1.1

Вариант	Задано	Вариант	Задано
2.1.0	$i(t) = 0,05 \cos(10^5 t + 25^\circ), \text{ А}$ $u(t) = 50 \cos(10^5 t - 20^\circ), \text{ В}$	2.1.1	$i(t) = 5 \cos\left(10^4 t - \frac{\pi}{6}\right), \text{ мА}$ $u(t) = 10 \cos\left(10^4 t + \frac{\pi}{6}\right), \text{ В}$
2.1.2	$i(t) = 5 \cos\left(10^4 t + \frac{\pi}{6}\right), \text{ мА}$ $u(t) = 15 \cos\left(10^4 t - \frac{\pi}{6}\right), \text{ В}$	2.1.3	$i(t) = 0,1 \cos\left(10^5 t + \frac{\pi}{6}\right), \text{ А}$ $u(t) = 20 \cos 10^5 t, \text{ В}$
2.1.4	$i(t) = 0,03 \cos\left(10^4 t - \frac{\pi}{4}\right), \text{ А}$ $u(t) = 12 \cos\left(10^4 t - \frac{3}{4}\pi\right), \text{ В}$	2.1.5	$i(t) = 0,15 \cos(10^5 t + \pi), \text{ А}$ $u(t) = 4,5 \cos\left(10^5 t + \frac{3}{4}\pi\right), \text{ В}$
2.1.6	$i(t) = 1,1 \cos\left(10^4 t + \frac{\pi}{6}\right), \text{ мА}$ $u(t) = 5,5 \cos\left(10^4 t + \frac{\pi}{2}\right), \text{ В}$	2.1.7	$i(t) = 0,01 \cos(10^5 t - 75^\circ), \text{ А}$ $u(t) = 20 \cos(10^5 t - 30^\circ), \text{ В}$

В задачах 2.1.8–2.1.15 рассчитайте комплексную проводимость двухполюсника, если заданы мгновенные значения напряжения и тока на его входе. Нарисуйте схему и найдите параметры элементов простейшей параллельной цепи, имеющей такую комплексную проводимость.

Таблица 2.1.2

Вариант	Задано	Вариант	Задано
2.1.8	$i(t) = 8 \cos\left(10^4 t + \frac{\pi}{2}\right), \text{ мА}$ $u(t) = \cos\left(10^4 t + \frac{\pi}{4}\right), \text{ В}$	2.1.9	$i(t) = 0,01 \cos\left(10^5 t - \frac{\pi}{6}\right), \text{ А}$ $u(t) = 5 \cos\left(10^5 t + \frac{\pi}{6}\right), \text{ В}$
2.1.10	$i(t) = 5 \cos(10^5 t + 88^\circ), \text{ А}$ $u(t) = 50 \cos(10^5 t + 148^\circ), \text{ В}$	2.1.11	$i(t) = 0,17 \cos(10^4 t - 124^\circ), \text{ А}$ $u(t) = 34 \cos(10^4 t - 154^\circ), \text{ В}$

Вариант	Задано	Вариант	Задано
2.1.12	$i(t) = 20 \cos(10^5 t + 20^\circ)$, мА $u(t) = 80 \cos(10^5 t + 65^\circ)$, В	2.1.13	$i(t) = 15 \cos(10^4 t - 30^\circ)$, мА $u(t) = 30 \cos(10^4 t - 60^\circ)$, В
2.1.14	$i(t) = 0,04 \cos(10^5 t + 30^\circ)$, А $u(t) = 40 \cos(10^5 t - 30^\circ)$, В	2.1.15	$i(t) = 40 \cos\left(10^5 t + \frac{\pi}{2}\right)$, мА $u(t) = 10 \cos\left(10^5 t + \frac{\pi}{4}\right)$, В

В задачах 2.1.16–2.1.25 нарисуйте схему и рассчитайте параметры элементов простейшей последовательной цепи, имеющей заданное комплексное сопротивление двухполюсника. Найдите ток $i(t)$ на его входе.

Таблица 2.1.3

Вариант	Задано	Вариант	Задано
2.1.16	$Z(j\omega) = 10^3 e^{-j45^\circ}$, Ом $u(t) = 10 \cos(10^4 t - 20^\circ)$, В	2.1.17	$Z(j\omega) = 10 e^{-j30^\circ}$, кОм $u(t) = 20 \cos(10^4 t + 40^\circ)$, В
2.1.18	$Z(j\omega) = 120 e^{-j60^\circ}$, Ом $u(t) = 12 \cos(10^4 t + 50^\circ)$, В	2.1.19	$Z(j\omega) = 360 e^{j45^\circ}$, Ом $u(t) = 18 \cos(10^4 t + 35^\circ)$, В
2.1.20	$Z(j\omega) = 3 \cdot 10^3 e^{j30^\circ}$, Ом $u(t) = 15 \cos(10^4 t - 75^\circ)$, В	2.1.21	$Z(j\omega) = 3,4 e^{-j\frac{\pi}{4}}$, Ом $u(t) = 17 \cos(10^4 t - \frac{\pi}{2})$, В
2.1.22	$Z(j\omega) = 3,5 e^{j\frac{\pi}{3}}$, кОм $u(t) = 35 \cos(10^4 t + \frac{\pi}{10})$, В	2.1.23	$Z(j\omega) = 4,8 e^{j\frac{\pi}{4}}$, кОм $u(t) = 24 \cos(10^4 t - \frac{\pi}{5})$, В
2.1.24	$Z(j\omega) = 100 e^{-j\frac{\pi}{6}}$, Ом $u(t) = 50 \cos(10^4 t - \frac{\pi}{3})$, В	2.1.25	$Z(j\omega) = 600 e^{j60^\circ}$, Ом $u(t) = 30 \cos(10^4 t + 75^\circ)$, В

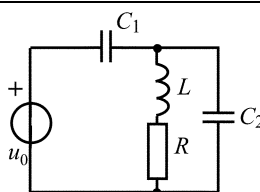
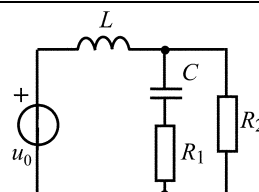
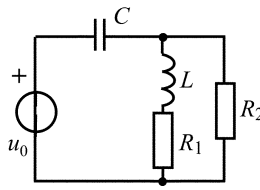
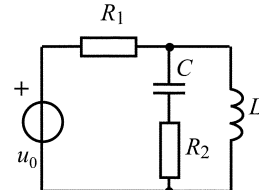
2.2. Символический метод анализа гармонических колебаний в разветвленных цепях

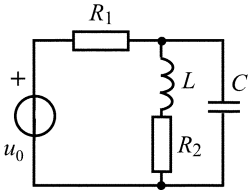
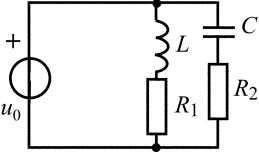
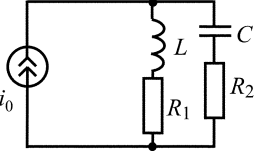
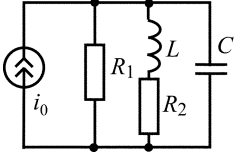
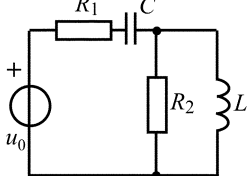
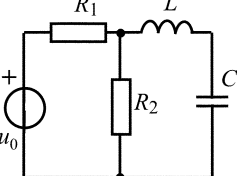
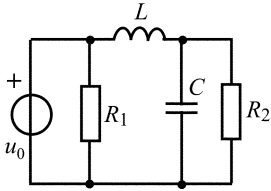
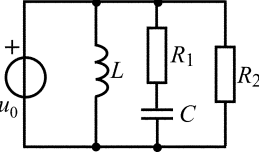
[1, с. 125–130; 2, с. 83–86]

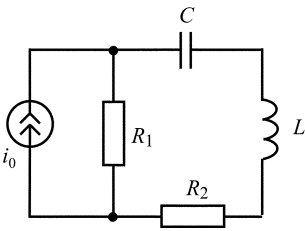
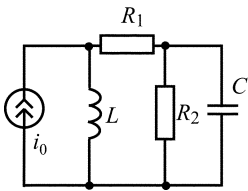
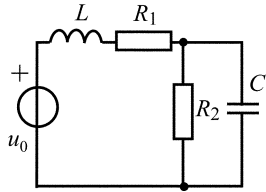
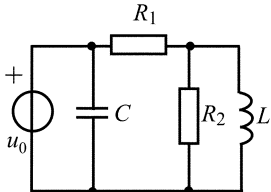
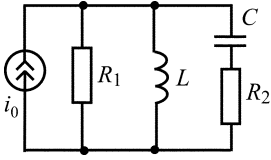
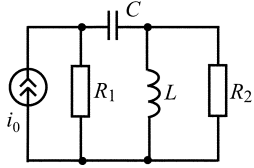
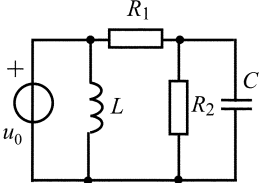
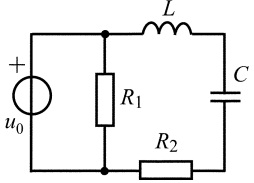
В задачах 2.2.0–2.2.25 при расчете токов ветвей заданной цепи символическим методом рекомендуется следующая последовательность действий:

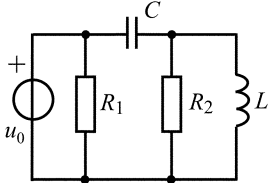
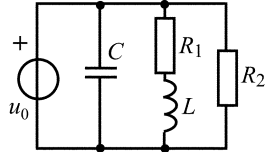
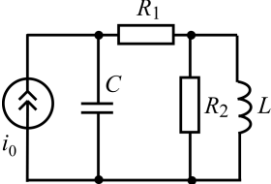
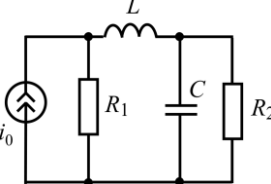
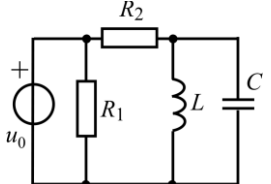
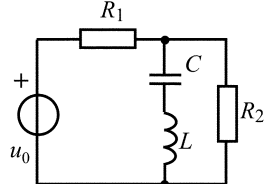
- запишите комплексную амплитуду и комплексное действующее значение воздействия;
- рассчитайте комплексные сопротивления элементов цепи;
- рассчитайте методом эквивалентных преобразований комплексные действующие значения токов ветвей цепи;
- запишите мгновенные значения токов ветвей цепи;
- сделайте проверку правильного расчета с помощью баланса мощностей, для чего рассчитайте комплексную \tilde{S} , среднюю (активную) P и реактивную Q мощности.

Таблица 2.2

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
2.2.0	 <p style="text-align: center;"> $L = 0,3 \text{ мГн}; C_1 = 0,333 \text{ мкФ};$ $C_2 = 0,166 \text{ мкФ}; R = 30 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 60 \cos(10^5 t + 50^\circ), \text{ В}$ </p>	2.2.1	 <p style="text-align: center;"> $L = 0,4 \text{ мГн}; C = 0,25 \text{ мкФ};$ $R_1 = 40 \text{ Ом}; R_2 = 80 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 20 \cos(10^5 t - 20^\circ), \text{ В}$ </p>
2.2.2	 <p style="text-align: center;"> $L = 4 \text{ мГн}; C = 0,04 \text{ мкФ};$ $R_1 = R_2 = 200 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 80 \cos(10^5 t - 60^\circ), \text{ В}$ </p>	2.2.3	 <p style="text-align: center;"> $L = 6 \text{ мГн}; C = 3,33 \text{ мкФ};$ $R_1 = R_2 = 30 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 90 \cos(10^4 t + 25^\circ), \text{ В}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
2.2.4	 <p> $L = 0,6 \text{ мГн}; C = 0,0833 \text{ мкФ};$ $R_1 = R_2 = 60 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 18 \cos(10^5 t + 30^\circ), \text{ В}$ </p>	2.2.5	 <p> $L = 40 \text{ мГн}; C = 0,25 \text{ мкФ};$ $R_1 = R_2 = 400 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 40 \cos(10^4 t - 20^\circ), \text{ В}$ </p>
2.2.6	 <p> $L = 2 \text{ мГн}; C = 0,025 \text{ мкФ};$ $R_1 = 200 \text{ Ом}; R_2 = 400 \text{ Ом};$ $i_0(t) = 0,02 \cos(10^5 t - 45^\circ), \text{ А}$ </p>	2.2.7	 <p> $L = 20 \text{ мГн}; C = 0,25 \text{ мкФ};$ $R_1 = 400 \text{ Ом}; R_2 = 200 \text{ Ом};$ $i_0(t) = 0,4 \cos(10^4 t + 10^\circ), \text{ А}$ </p>
2.2.8	 <p> $L = 0,5 \text{ мГн}; C = 0,1 \text{ мкФ};$ $R_1 = 100 \text{ Ом}; R_2 = 50 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 30 \cos(10^5 t - 70^\circ), \text{ В}$ </p>	2.2.9	 <p> $L = 10 \text{ мГн}; C = 0,005 \text{ мкФ};$ $R_1 = 0,5 \text{ кОм}; R_2 = 1 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 2 \cos(10^5 t + 25^\circ), \text{ В}$ </p>
2.2.10	 <p> $L = 10 \text{ мГн}; C = 0,005 \text{ мкФ};$ $R_1 = 1 \text{ кОм}; R_2 = 2 \text{ кОм};$ $u_0(t) = 20 \cos(10^5 t + 60^\circ), \text{ В}$ </p>	2.2.11	 <p> $L = 20 \text{ мГн}; C = 0,25 \text{ мкФ};$ $R_1 = 400 \text{ Ом}; R_2 = 200 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 8 \cos(10^4 t + 10^\circ), \text{ В}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
2.2.12	 <p> $L = 20 \text{ мГн}; C = 0,01 \text{ мкФ};$ $R_1 = R_2 = 500 \text{ Ом};$ $i_0(t) = 0,4 \cos(10^5 t - 35^\circ), \text{ А}$ </p>	2.2.13	 <p> $L = 0,5 \text{ мГн}; C = 0,1 \text{ мкФ};$ $R_1 = 50 \text{ Ом}; R_2 = 100 \text{ Ом};$ $i_0(t) = 2 \cos(10^5 t + 30^\circ), \text{ А}$ </p>
2.2.14	 <p> $L = 50 \text{ мГн}; C = 0,4 \text{ мкФ};$ $R_1 = 500 \text{ Ом}; R_2 = 250 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 50 \cos(10^4 t + 30^\circ), \text{ В}$ </p>	2.2.15	 <p> $L = 0,8 \text{ мГн}; C = 0,25 \text{ мкФ};$ $R_1 = 40 \text{ Ом}; R_2 = 80 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 100 \cos(10^3 t - 20^\circ), \text{ В}$ </p>
2.2.16	 <p> $L = 80 \text{ мГн}; C = 0,25 \text{ мкФ};$ $R_1 = 800 \text{ Ом}; R_2 = 400 \text{ Ом};$ $i_0(t) = 0,05 \cos(10^4 t - 60^\circ), \text{ А}$ </p>	2.2.17	 <p> $L = 6 \text{ мГн}; C = 3,33 \text{ мкФ};$ $R_1 = 30 \text{ Ом}; R_2 = 60 \text{ Ом};$ $i_0(t) = 0,2 \cos(10^4 t + 25^\circ), \text{ А}$ </p>
2.2.18	 <p> $L = 0,4 \text{ мГн}; C = 0,125 \text{ мкФ};$ $R_1 = 40 \text{ Ом}; R_2 = 80 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 40 \cos(10^3 t + 50^\circ), \text{ В}$ </p>	2.2.19	 <p> $L = 0,6 \text{ мГн}; C = 0,0833 \text{ мкФ};$ $R_1 = 120 \text{ Ом}; R_2 = 60 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 60 \cos(10^5 t + 15^\circ), \text{ В}$ </p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
2.2.20	 <p> $L = 0,6 \text{ мГн}; C = 0,166 \text{ мкФ};$ $R_1 = R_2 = 60 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 60 \cos(10^5 t - 15^\circ), \text{ В}$ </p>	2.2.21	 <p> $L = 0,2 \text{ мГн}; C = 0,25 \text{ мкФ};$ $R_1 = 20 \text{ Ом}; R_2 = 40 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 48 \cos(10^5 t + 75^\circ), \text{ В}$ </p>
2.2.22	 <p> $L = 0,5 \text{ мГн}; C = 0,2 \text{ мкФ};$ $R_1 = 25 \text{ Ом}; R_2 = 50 \text{ Ом};$ $i_0(t) = 0,6 \cos(10^5 t + 80^\circ), \text{ А}$ </p>	2.2.23	 <p> $L = 20 \text{ мГн}; C = 0,5 \text{ мкФ};$ $R_1 = 100 \text{ Ом}; R_2 = 200 \text{ Ом};$ $i_0(t) = 1,2 \cos(10^4 t + 50^\circ), \text{ А}$ </p>
2.2.24	 <p> $L = 2 \text{ мГн}; C = 0,1 \text{ мкФ};$ $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 50 \cos(10^5 t + 80^\circ), \text{ В}$ </p>	2.2.25	 <p> $L = 20 \text{ мГн}; C = 0,25 \text{ мкФ};$ $R_1 = 100 \text{ Ом}; R_2 = 200 \text{ Ом};$ $u_0(t) = 40 \cos(10^4 t - 25^\circ), \text{ В}$ </p>

2.3. Символический метод анализа гармонических колебаний в цепях с индуктивными связями

[1, с. 134–140; 2, с. 89–94]

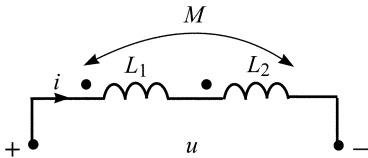
В цепях с индуктивными связями возникает явление взаимоиндукции, а именно: при наличии двух и более индуктивных катушек с общим магнитным потоком напряжение в любой из таких катушек зависит от изменения не только тока, проходящего через катушку, но и от токов, проходящих через другие индуктивно связанные с ней катушки.

Количественно взаимная индуктивность определяется коэффициентом

$$M = k\sqrt{L_1L_2},$$

где k – коэффициент связи, который характеризует степень магнитной связи между катушками и может принимать значения $0 \leq k \leq 1$.

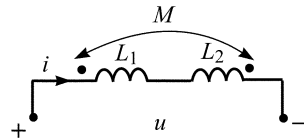
При составлении уравнений для цепей с индуктивными связями необходимо учитывать согласно или встречно включены катушки индуктивности. При согласном включении двух последовательно соединенных катушек (рис. 2.3.1) токи одинаково направлены относительно калибровочных меток – точек, показывающих начало намотки катушек, а значит, магнитные потоки обеих катушек складываются, а при встречном включении (рис. 2.3.2) – наоборот.



$$L_{1Э} = L_1 + M; L_{2Э} = L_2 + M;$$

$$L_Э = L_1 + L_2 + 2M$$

Рис. 2.3.1



$$L_{1Э} = L_1 - M; L_{2Э} = L_2 - M;$$

$$L_Э = L_1 + L_2 - 2M$$

Рис. 2.3.2

В задачах 2.3.0–2.3.25 при расчете символическим методом искомых величин в одной из заданных цепей на рис. 2.3.3–2.3.8 рекомендуется следующая последовательность действий:

- запишите комплексную амплитуду и комплексное действующее значение воздействия;
- рассчитайте комплексные сопротивления элементов цепи;
- рассчитайте комплексное входное сопротивление цепи $Z_{вх}(j\omega)$, учитывая согласное или встречное включение катушек индуктивности;
- рассчитайте значение искомых величин.

В задачах 2.3.0–2.3.6 для цепи на рис. 2.3.3 в табл. 2.3.1 приведены заданные и искомые величины.

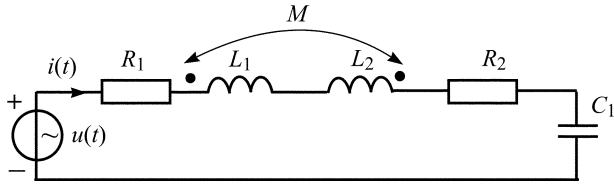


Рис. 2.3.3

Таблица 2.3.1

Вариант	Задано	Найти
2.3.0	$u(t) = 10 \cos(10^5 t + 30^\circ), \text{ В}$ $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$ $L_1 = 8 \text{ мГн}, L_2 = 3 \text{ мГн}$ $M = 4 \text{ мГн}$ $C_1 = 20 \text{ нФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_2}(t)$
2.3.1	$u(t) = 20 \cos(10^5 t + 60^\circ), \text{ В}$ $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$ $L_1 = 5 \text{ мГн}, L_2 = 4 \text{ мГн}$ $M = 2 \text{ мГн}$ $C_1 = 20 \text{ нФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_1}(t)$
2.3.2	$u(t) = 50 \cos(10^5 t + 30^\circ), \text{ В}$ $i(t) = 0,2 \cos(10^5 t + 30^\circ), \text{ А}$ $R_1 = R_2 = 125 \text{ Ом}$ $L_2 = 4 \text{ мГн}, M = 5 \text{ мГн}$ $C_1 = 0,125 \text{ мкФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ L_1 $u_{L_1}(t)$
2.3.3	$u(t) = 40 \cos(10^5 t + 40^\circ), \text{ В}$ $i(t) = 0,1 \cos(10^5 t + 40^\circ), \text{ А}$ $R_1 = R_2 = 200 \text{ Ом}$ $L_1 = 4,3 \text{ мГн}, M = 4 \text{ мГн}$ $C_1 = 0,125 \text{ мкФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ L_2 $u_{L_2}(t)$
2.3.4	$u(t) = 20 \cos(10^5 t + 60^\circ), \text{ В}$ $i(t) = 0,1 \cos(10^5 t + 60^\circ), \text{ А}$ $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$ $L_1 = 4 \text{ мГн}, L_2 = 6 \text{ мГн}$ $C_1 = 0,25 \text{ мкФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ M $u_{L_1}(t)$

Вариант	Задано	Найти
2.3.5	$u(t) = 10\sqrt{2} \cos(10^5 t + 75^\circ), \text{ В}$ $R_1 = R_2 = 125 \text{ Ом}$ $L_1 = 8,5 \text{ мГн}, L_2 = 2 \text{ мГн}$ $M = 4 \text{ мГн}$ $C_1 = 20 \text{ нФ}$	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_2}(t)$
2.3.6	$u(t) = 20\sqrt{2} \cos(10^5 t + 60^\circ), \text{ В}$ $R_1 = R_2 = 125 \text{ Ом}$ $L_1 = 0,6 \text{ мГн}, L_2 = 3,5 \text{ мГн}$ $M = 0,8 \text{ мГн}$ $C_1 = 20 \text{ нФ}$	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_1}(t)$

В задачах 2.3.7–2.3.10 для цепи на рис. 2.3.4 в табл. 2.3.2 приведены заданные и искомые величины.

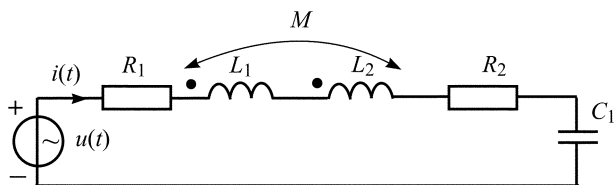


Рис. 2.3.4

Таблица 2.3.2

Вариант	Задано	Найти
2.3.7	$u(t) = 10 \cos(10^5 t + 30^\circ), \text{ В}$ $R_1 = R_2 = 200 \text{ Ом}$ $L_1 = 2 \text{ мГн}, L_2 = 3 \text{ мГн}$ $M = 2 \text{ мГн}$ $C_1 = 20 \text{ нФ}$	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_2}(t)$

Вариант	Задано	Найти
2.3.8	$u(t) = 20\cos(10^5 t + 60^\circ)$, В $R_1 = R_2 = 100$ Ом $L_1 = 2$ мГн, $L_2 = 3$ мГн $M = 1$ мГн $C_1 = 20$ нФ	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L1}(t)$
2.3.9	$u(t) = 40\cos(10^5 t + 30^\circ)$, В $i(t) = 0,2\cos(10^5 t + 30^\circ)$, А $R_1 = R_2 = 100$ Ом $L_2 = 1,5$ мГн, $M = 1$ мГн $C_1 = 25$ нФ	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ L_1 $u_{L1}(t)$
2.3.10	$u(t) = 40\cos(10^5 t + 40^\circ)$, В $i(t) = 0,1\cos(10^5 t + 40^\circ)$, А $R_1 = R_2 = 200$ Ом $L_1 = 4$ мГн, $M = 2$ мГн $C_1 = 10$ нФ	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ L_2 $u_{L2}(t)$

В задачах 2.3.11–2.3.16 для цепи на рис. 2.3.5 в табл. 2.3.3 приведены заданные и искомые величины.

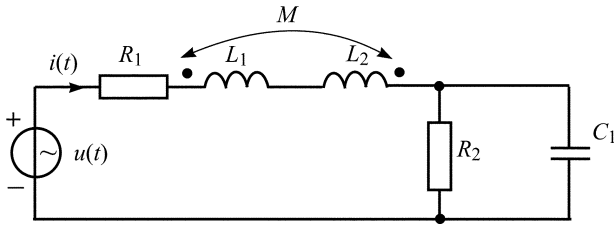


Рис. 2.3.5

Таблица 2.3.3

Вариант	Задано	Найти
2.3.11	$u(t) = 40 \cos(10^5 t + 80^\circ), \text{ В}$ $R_1 = 150 \text{ Ом}, R_2 = 500 \text{ Ом}$ $L_1 = 5,5 \text{ мГн}, L_2 = 3 \text{ мГн}$ $M = 4 \text{ мГн}$ $C_1 = 20 \text{ нФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_2}(t)$
2.3.12	$u(t) = 20 \cos(10^5 t + 30^\circ), \text{ В}$ $R_1 = 150 \text{ Ом}, R_2 = 100 \text{ Ом}$ $L_1 = 8 \text{ мГн}, L_2 = 2,5 \text{ мГн}$ $M = 4 \text{ мГн}$ $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_1}(t)$
2.3.13	$u(t) = 40 \cos(10^5 t + 50^\circ), \text{ В}$ $i(t) = 0,2 \cos(10^5 t + 50^\circ), \text{ А}$ $R_1 = 150 \text{ Ом}, R_2 = 100 \text{ Ом}$ $L_2 = 5 \text{ мГн}, M = 4 \text{ мГн}$ $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ L_1 $u_{L_1}(t)$
2.3.14	$u(t) = 40 \cos(10^5 t + 40^\circ), \text{ В}$ $i(t) = 0,1 \cos(10^5 t + 40^\circ), \text{ А}$ $R_1 = 300 \text{ Ом}, R_2 = 200 \text{ Ом}$ $L_1 = 6 \text{ мГн}, M = 4 \text{ мГн}$ $C_1 = 50 \text{ нФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ L_2 $u_{L_2}(t)$
2.3.15	$u(t) = 5\sqrt{2} \cos(10^5 t - 75^\circ), \text{ В}$ $R_1 = 50 \text{ Ом}, R_2 = 400 \text{ Ом}$ $L_1 = 5,5 \text{ мГн}, L_2 = 3 \text{ мГн}$ $M = 2 \text{ мГн}$ $C_1 = 25 \text{ нФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_2}(t)$
2.3.16	$u(t) = 20\sqrt{2} \cos(10^5 t - 60^\circ), \text{ В}$ $R_1 = 50 \text{ Ом}, R_2 = 400 \text{ Ом}$ $L_1 = 1 \text{ мГн}, L_2 = 7,5 \text{ мГн}$ $M = 2 \text{ мГн}$ $C_1 = 25 \text{ нФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_1}(t)$

В задачах 2.3.17–2.3.20 для цепи на рис. 2.3.6 в табл. 2.3.4 приведены заданные и искомые величины.

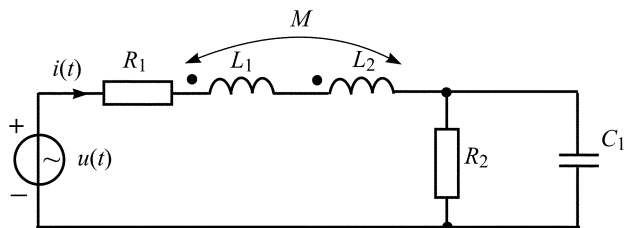


Рис. 2.3.6

Таблица 2.3.4

Вариант	Задано	Найти
2.3.17	$u(t) = 30 \cos(10^5 t + 120^\circ), \text{ В}$ $R_1 = R_2 = 200 \text{ Ом}$ $L_1 = 2 \text{ мГн}, L_2 = 1 \text{ мГн}$ $M = 0,5 \text{ мГн}$ $C_1 = 50 \text{ нФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L2}(t)$
2.3.18	$u(t) = 15 \cos(10^5 t + 20^\circ), \text{ В}$ $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$ $L_1 = 0,8 \text{ мГн}, L_2 = 0,4 \text{ мГн}$ $M = 0,4 \text{ мГн}$ $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L1}(t)$
2.3.19	$u(t) = 40\sqrt{2} \cos(10^5 t + 30^\circ), \text{ В}$ $i(t) = 0,2 \cos(10^5 t - 15^\circ), \text{ А}$ $R_1 = 100 \text{ Ом}, R_2 = 200 \text{ Ом}$ $L_2 = 1 \text{ мГн}, M = 0,5 \text{ мГн}$ $C_1 = 50 \text{ нФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ L_1 $u_{L1}(t)$
2.3.20	$u(t) = 10\sqrt{2} \cos(10^5 t + 60^\circ), \text{ В}$ $i(t) = 0,05 \cos(10^5 t + 15^\circ), \text{ А}$ $R_1 = 100 \text{ Ом}, R_2 = 200 \text{ Ом}$ $L_1 = 1 \text{ мГн}, M = 0,5 \text{ мГн}$ $C_1 = 50 \text{ нФ}$	$Z_{\text{BX}}(j\omega)$ L_2 $u_{L2}(t)$

В задачах 2.3.21–2.3.23 для цепи на рис. 2.3.7 в табл. 2.3.5 приведены заданные и искомые величины.

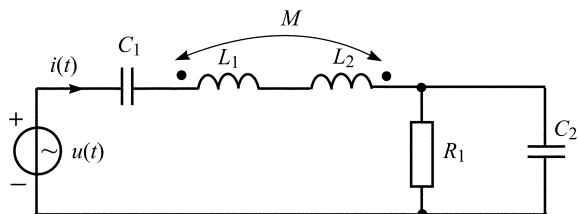


Рис. 2.3.7

Таблица 2.3.5

Вариант	Задано	Найти
2.3.21	$u(t) = 10\cos(10^5 t + 30^\circ), \text{В}$ $R_1 = 100 \text{ Ом}$ $L_1 = 1 \text{ мГн}, L_2 = 2 \text{ мГн}$ $M = 0,5 \text{ мГн}$ $C_1 = C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_1}(t)$
2.3.22	$u(t) = 20\cos(10^5 t + 60^\circ), \text{В}$ $R_1 = 200 \text{ Ом}$ $L_1 = 4 \text{ мГн}, L_2 = 1 \text{ мГн}$ $M = 2 \text{ мГн}$ $C_1 = 100 \text{ нФ}; C_2 = 50 \text{ нФ}$	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_2}(t)$
2.3.23	$u(t) = 15\cos(10^5 t + 10^\circ), \text{В}$ $R_1 = 100 \text{ Ом}$ $L_1 = 2,5 \text{ мГн}, L_2 = 4 \text{ мГн}$ $M = 3 \text{ мГн}$ $C_1 = 200 \text{ нФ}, C_2 = 100 \text{ нФ}$	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_1}(t)$

В задачах 2.3.24–2.3.25 для цепи на рис. 2.3.8 в табл. 2.3.6 приведены заданные и искомые величины.

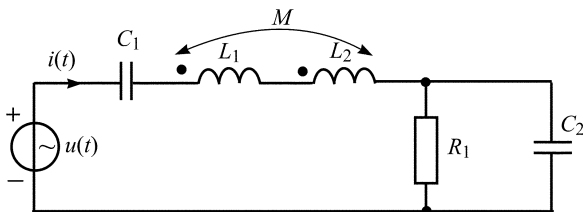


Рис. 2.3.8

Таблица 2.3.6

Вариант	Задано	Найти
2.3.24	$u(t) = 12\sqrt{2} \cos(10^5 t + 15^\circ), \text{ В}$ $R_1 = 400 \text{ Ом}$ $L_1 = 1 \text{ мГн}, L_2 = 2 \text{ мГн}$ $M = 1 \text{ мГн}$ $C_1 = 100 \text{ нФ}, C_2 = 25 \text{ нФ}$	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_2}(t)$
2.3.25	$u(t) = 20\sqrt{2} \cos(10^5 t + 70^\circ), \text{ В}$ $R_1 = 500 \text{ Ом}$ $L_1 = 3 \text{ мГн}, L_2 = 1 \text{ мГн}$ $M = 1 \text{ мГн}$ $C_1 = 100 \text{ нФ}, C_2 = 20 \text{ нФ}$	$Z_{\text{вх}}(j\omega)$ $i(t)$ $u_{L_1}(t)$

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте определения понятий: амплитуда, период, частота, угловая частота, фаза, начальная фаза гармонического колебания.
2. Что называют действующим значением периодического колебания? Чему равно действующее значение гармонического колебания?
3. Как определяется средняя мощность гармонических колебаний?
4. Какими соотношениями связаны амплитуды (действующие значения) гармонического тока и напряжения на резистивном сопротивлении, индуктивности, емкости?
5. Как сдвинуты по фазе ток и напряжение на резистивном сопротивлении, индуктивности, емкости?
6. Как комплексная амплитуда связана с мгновенным значением гармонического колебания? Как мгновенное значение связано с комплексной амплитудой?
7. Запишите комплексные сопротивления резистивного сопротивления, индуктивности и емкости.
8. Какой физический смысл имеет модуль, аргумент, вещественная и мнимая части комплексного сопротивления цепи?
9. Какие значения может принимать аргумент комплексного сопротивления пассивной цепи?
10. Что понимают под комплексной мощностью? Что означает ее вещественная и мнимая части?
11. Запишите условия баланса активной (средней) и реактивной мощностей.
12. Какое явление называется явлением взаимной индукции?
13. Каковы особенности составления уравнений для линейных цепей с индуктивными связями?

3. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА. КОМПЛЕКСНЫЕ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ

Частотные зависимости гармонических колебаний в ЭЦ, содержащих пассивные элементы R , L и C , обусловлены зависимостью от частоты сопротивлений реактивных элементов $L(\omega L)$ и $C\left(\frac{1}{\omega C}\right)$.

Применение символического метода анализа гармонических колебаний в ЭЦ позволяет ввести понятие комплексной передаточной функции $H(j\omega)$, которая представляет собой отношение комплексной амплитуды реакции ЭЦ к комплексной амплитуде воздействия.

Если комплексную передаточную функцию представить в показательной форме записи

$$H(j\omega) = |H(j\omega)|e^{j\theta(\omega)},$$

то $|H(j\omega)|$ – модуль комплексной передаточной функции определяет амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) цепи;

$\theta(\omega)$ – аргумент комплексной передаточной функции определяет фазочастотную характеристику (ФЧХ) цепи.

Частотные характеристики ЭЦ описывают собственно цепь и не зависят от значений амплитуд и начальных фаз, приложенных к цепи воздействий.

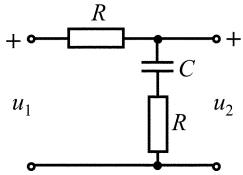
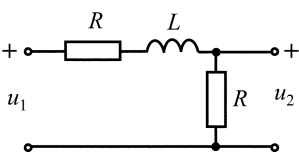
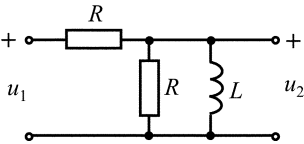
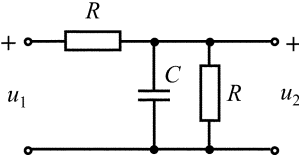
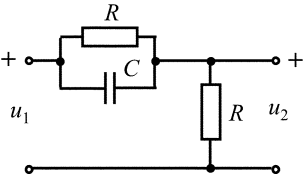
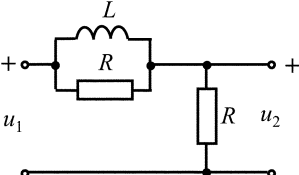
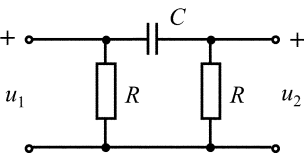
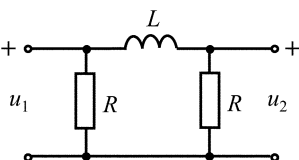
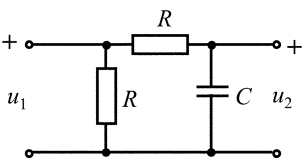
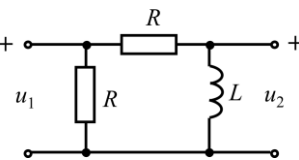
3.1. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики пассивных четырехполюсников

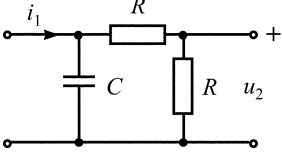
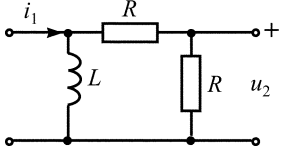
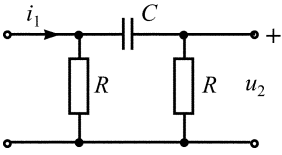
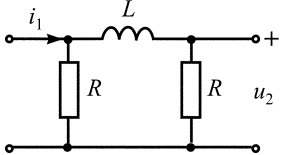
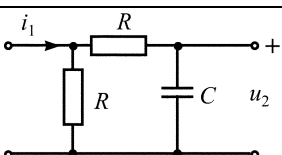
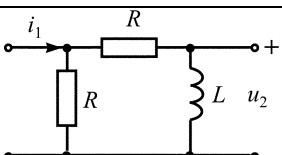
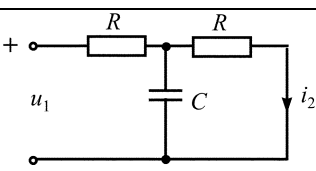
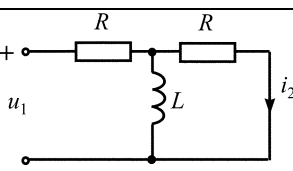
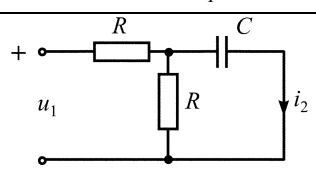
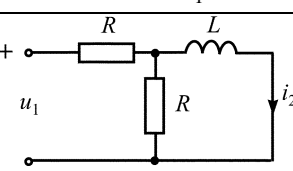
[1, с. 148–156; 2, с. 110–112]

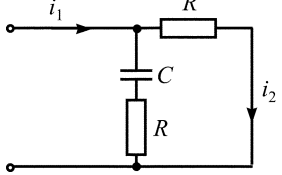
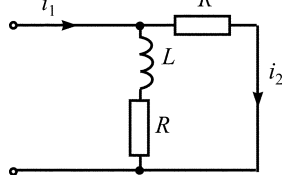
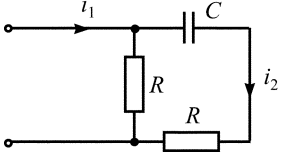
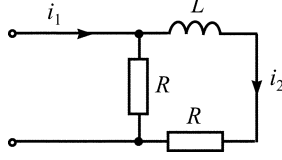
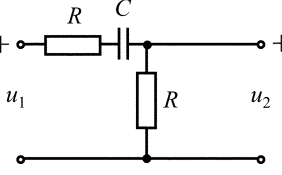
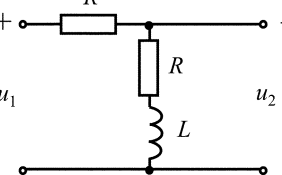
При выполнении задач 3.1.0–3.1.25 рекомендуется следующая последовательность действий:

- найдите комплексную передаточную функцию цепи указанного вида;
- запишите выражения для АЧХ и ФЧХ цепи;
- постройте качественные графики АЧХ и ФЧХ цепи по их значениям при $\omega = 0$ и $\omega \rightarrow \infty$;
- рассчитайте значение граничной частоты $\omega_{гр}$ и покажите на графике АЧХ полосу пропускания четырехполюсника.

Таблица 3.1

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
3.1.0	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$	3.1.1	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$
3.1.2	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$	3.1.3	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$
3.1.4	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$	3.1.5	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$
3.1.6	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$	3.1.7	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$
3.1.8	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$	3.1.9	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
3.1.10	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$	3.1.11	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$
3.1.12	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$	3.1.13	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$
3.1.14	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$	3.1.15	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$
3.1.16	 $H(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$	3.1.17	 $H(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$
3.1.18	 $H(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$	3.1.19	 $H(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
3.1.20	 $H(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$	3.1.21	 $H(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$
3.1.22	 $H(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$	3.1.23	 $H(j\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1}$
3.1.24	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$	3.1.25	 $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$

3.2. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики активных RC-цепей

[1, с. 132–134]

При выполнении задач 3.2.0–3.2.25 рекомендуется следующая последовательность действий:

- нарисуйте схему замещения заданной цепи в комплексной форме, заменив схемное изображение усилителя его схемой замещения в виде ИНУН из табл. 3.2.1. Коэффициент усиления может быть либо сколь угодно большим ($\mu \rightarrow \infty$), либо конечным положительным или отрицательным числом K ;

- найдите комплексную передаточную функцию $H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$

методом узловых напряжений, для чего в качестве базисного выберите узел со знаком «-»;

- запишите выражения для АЧХ и ФЧХ цепи;
- постройте качественные графики АЧХ и ФЧХ цепи по их значениям при $\omega = 0$ и $\omega \rightarrow \infty$;
- рассчитайте значение граничной частоты $\omega_{гр}$ и покажите на графике АЧХ полосу пропусками АРС-цепи;
- рассчитайте в линейном масштабе графики АЧХ и ФЧХ на ПК с помощью программы «FASTMEAN», определите с помощью линейки значение граничной частоты и сравните его со значением, полученным аналитически.

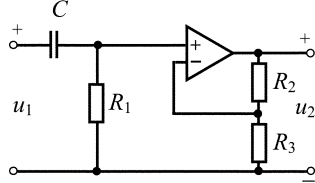
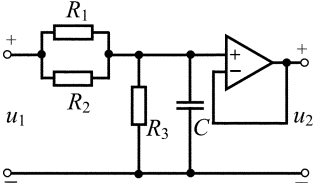
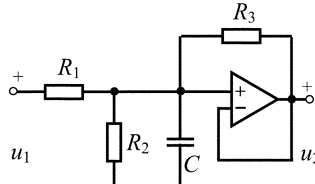
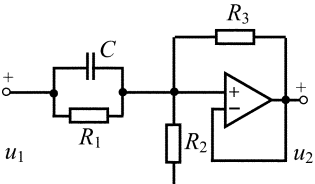
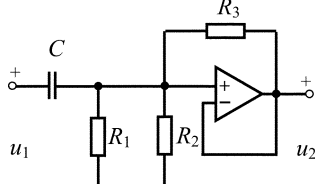
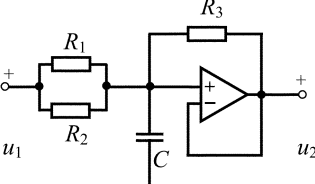
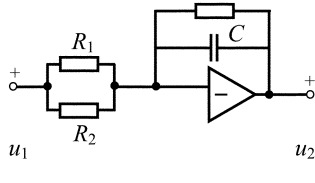
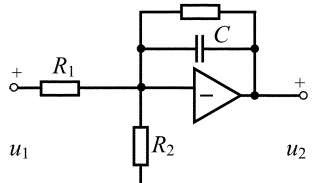
Таблица 3.2.1

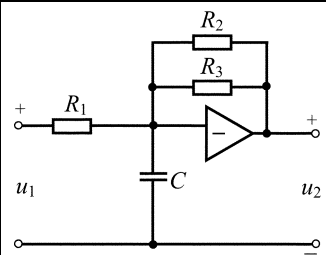
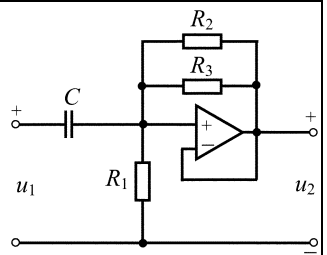
Наименование элемента	Схемное изображение по ГОСТ	Схемное изображение в стандартных программах для ПК	Схемы замещения
Дифференциальный операционный усилитель			
Инверсный операционный усилитель			
Усилитель с конечным усилением			
Усилитель-повторитель напряжения			

Таблица 3.2.2

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
3.2.0	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R = 100 \text{ кОМ};$ $C = 2 \text{ нФ}; K = 2$</p>	3.2.1	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОМ};$ $C = 5 \text{ нФ}; K = 2$</p>
3.2.2	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОМ};$ $C = 6 \text{ нФ}; K = 3$</p>	3.2.3	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОМ};$ $C = 3 \text{ нФ}; K = 1$</p>
3.2.4	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОМ};$ $C = 2 \text{ нФ}; K = 1$</p>	3.2.5	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОМ};$ $C = 7 \text{ нФ}; K = 4$</p>
3.2.6	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОМ};$ $C = 1 \text{ нФ}; K = 2$</p>	3.2.7	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОМ};$ $C = 1,5 \text{ нФ}; K = 5$</p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
3.2.8	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 1 \text{ нФ}; K = 2$</p>	3.2.9	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 2 \text{ нФ}; K = 1$</p>
3.2.10	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 1 \text{ нФ}; K = 1$</p>	3.2.11	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 5 \text{ нФ}; K = 0,5$</p>
3.2.12	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 1 \text{ нФ}; K = 2$</p>	3.2.13	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 5 \text{ нФ}; K = 0,4$</p>
3.2.14	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 5 \text{ нФ}; K = 0,5$</p>	3.2.15	<p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 1 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$</p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
3.2.16	 <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 1 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$</p>	3.2.17	 <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 3 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$</p>
3.2.18	 <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 2 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$</p>	3.2.19	 <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 1 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$</p>
3.2.20	 <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 2 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$</p>	3.2.21	 <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 2 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$</p>
3.2.22	 <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 1 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$</p>	3.2.23	 <p>$R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 1 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$</p>

Вариант	Схема цепи	Вариант	Схема цепи
3.2.24	 <p> $R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 5 \text{ нФ}; K = 1$ </p>	3.2.25	 <p> $R_1 = R_2 = R_3 = R = 100 \text{ кОм};$ $C = 1 \text{ нФ}; \mu \rightarrow \infty$ </p>

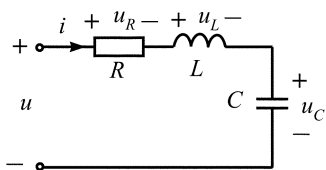
Контрольные вопросы

1. Что называется комплексной передаточной функцией цепи?
2. Запишите виды комплексных передаточных функций с указанием их размерности.
3. Запишите комплексную передаточную функцию в показательной форме записи.
4. Что называется амплитудно-частотными и фазочастотными характеристиками цепи? Как они связаны с комплексной передаточной функцией?
5. Что называется полосой пропускания цепи?
6. Каковы особенности нахождения частотных характеристик АРС-цепей?

4. РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ. КОМПЛЕКСНЫЕ ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ И ИХ ЭЛЕКТРОННЫХ АНАЛОГОВ

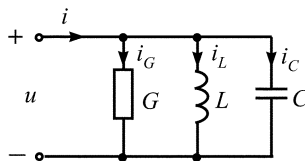
Явление значительного возрастания амплитуды гармонической реакции по мере приближения частоты внешнего гармонического воздействия к частоте собственных незатухающих колебаний контура ω_0 называется явлением резонанса. При резонансе в цепи, содержащей реактивные элементы L и C , ток совпадает по фазе с напряжением на зажимах цепи, так как $\varphi_{\omega=\omega_0} = 0$, где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота контура. Цепи, в которых возникает режим резонанса, называют колебательными (резонансными) контурами.

Рассмотрим канонические схемы последовательного (рис. 4.1) и параллельного (рис. 4.2) колебательных контуров.



$$Z(j\omega_0) = R + j\left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right) = R$$

Рис. 4.1



$$Y(j\omega_0) = G + j\left(\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L}\right) = G$$

Рис. 4.2

В последовательном колебательном контуре возникает резонанс напряжений, при котором гармонические напряжения на индуктивности и емкости при резонансной частоте компенсируют друг друга.

Амплитуды колебаний напряжений на зажимах реактивных элементов могут значительно превышать амплитуду напряжения на входе цепи. Отношение этих амплитуд называется добротностью контура:

$$\left. \frac{U_{mL}}{U_m} \right|_{\omega=\omega_0} = \left. \frac{U_{mC}}{U_m} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = Q.$$

В параллельном колебательном контуре возникает резонанс токов, при котором токи через индуктивность и емкость при резонансной частоте компенсируют друг друга.

Отношение амплитуд токов в реактивных элементах контура и тока источника характеризует добротность контура

$$Q = \frac{I_{mC}}{I_m} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{I_{mL}}{I_m} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{\omega_0 LG}.$$

Значения добротности Q последовательных и параллельных LC -колебательных контуров могут достигать до нескольких сотен единиц.

При анализе последовательного и параллельного контуров целесообразно использовать принцип дуальности.

4.1. Параметры последовательного колебательного контура

[1, с. 112–114; 2, с. 113–115]

При выполнении задач 4.1.1–4.1.25 рекомендуется следующая последовательность действий:

- определите в табл. 4.1.1 в соответствии с номером варианта значение n и четырехзначный код, каждая цифра которого обозначает один заданный параметр;

Таблица 4.1.1

Вариант	4.1.0			4.1.1	4.1.2	4.1.3	4.1.4
Код	$R = 20 \text{ Ом}; L = 4 \text{ мГн};$ $C = 400 \text{ нФ}; U_0 = 2 \text{ В}$			1368 $n=1$	0249 $n=2$	1358 $n=3$	1367 $n=4$
Вариант	4.1.5	4.1.6	4.1.7	4.1.8	4.1.9	4.1.10	4.1.11
Код	0349 $n=5$	0258 $n=1$	1467 $n=2$	0238 $n=3$	1257 $n=4$	0369 $n=5$	0248 $n=1$
Вариант	4.1.12	4.1.13	4.1.14	4.1.15	4.1.16	4.1.17	4.1.18
Код	1359 $n=2$	1267 $n=3$	2358 $n=4$	0147 $n=5$	2369 $n=1$	3458 $n=2$	0359 $n=3$
Вариант	4.1.19	4.1.20	4.1.21	4.1.22	4.1.23	4.1.24	4.1.25
Код	1567 $n=4$	1457 $n=5$	0159 $n=1$	0367 $n=2$	0148 $n=3$	0469 $n=4$	2567 $n=5$

- выберите в табл. 4.1.2 для каждой цифры кода, соответствующий параметр контура, и рассчитайте его величину;
- рассчитайте значения остальных неизвестных для заданного варианта шести параметров из табл. 4.1.2;
- рассчитайте значения напряжений U_{R0} , U_{L0} , U_{C0} на элементах R , L , C контура при резонансной частоте ω_0 .

Таблица 4.1.2

Цифра кода	Параметры резонансного контура	
0	$R = 10 + n$, Ом	Резистивное сопротивление
1	$L = 20 + n$, мГн	Индуктивность
2	$C = 800 + 10n$, нФ	Емкость
3	$f_0 = 1 + 0,1n$, кГц	Циклическая резонансная частота
4	$\rho = 160 + 2n$, Ом	Характеристическое сопротивление
5	$Q = 10 + n$	Добротность
6	$2\Delta f^* = f_1 - f_{-1} = 80 + 2n$, Гц	Полоса пропускания
7	$U_0 = n$, В	Напряжение на зажимах контура при резонансе
8	$I_0 = 0,1n$, А	Ток в контуре при резонансе
9	$P_0 = 0,1n$, Вт	Средняя мощность, потребляемая контуром при резонансе

4.2. Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики последовательного колебательного контура

[1, с. 156–162; 2, с. 115–120]

Комплексные передаточные функции по напряжению последовательного колебательного контура (рис. 4.1), их амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики приведены в табл. 4.2.

При выполнении задач 4.2.0–4.2.25 рекомендуется следующая последовательность действий:

- рассчитайте приведенные в табл. 4.2 комплексные передаточные функции, их АЧХ и ФЧХ, подставив значения параметров контура для своего варианта из задачи 4.1;
- рассчитайте на резонансной частоте ω_0 значения амплитудно-частотных характеристик: $|H_C(j\omega_0)|$, $|H_L(j\omega_0)|$, $H_R(j\omega_0)$ и фазочастотных характеристик: $\theta_C(\omega_0)$, $\theta_L(\omega_0)$, $\theta_R(\omega_0)$;

- рассчитайте приведенные в табл. 4.2 характеристики последовательного колебательного контура в линейном масштабе на ПК с использованием программы FASTMEAN;
- определите с помощью линейки по графику АЧХ $H_R(j\omega)$ резонансную частоту f_0 и полосу пропускания $2\Delta f^* = f_1 - f_{-1}$, и сравните их с рассчитанными значениями в задаче 4.1;
- определите с помощью линейки на резонансной частоте по графикам АЧХ значения: $|H_C(j\omega_0)|$, $|H_L(j\omega_0)|$, $H_R(j\omega_0)$ и значения ФЧХ: $\theta_C(\omega_0)$, $\theta_L(\omega_0)$, $\theta_R(\omega_0)$ и сравните их с рассчитанными по формулам.

Таблица 4.2

Комплексные передаточные функции	Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики
$H_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}} = \frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$	$ H_C(j\omega) = \frac{\frac{1}{LC}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ $\theta_C(\omega) = -\arctg \frac{\omega R/L}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
$H_L(j\omega) = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}} = \frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$	$ H_L(j\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ $\theta_L(\omega) = \pi - \arctg \frac{\omega R/L}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$
$H_R(j\omega) = \frac{\dot{U}_R}{\dot{U}} = \frac{j\omega \frac{R}{L}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$	$ H_R(j\omega) = \frac{\frac{\omega R}{L}}{\sqrt{(-\omega^2 + \frac{1}{LC})^2 + \frac{\omega^2 R^2}{L^2}}}$ $\theta_R(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\omega R/L}{-\omega^2 + \frac{1}{LC}}$

4.3. Частотные характеристики электронных аналогов последовательного колебательного контура

[1, с. 162–163; 2, с. 120]

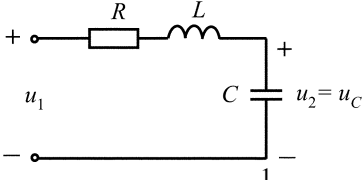
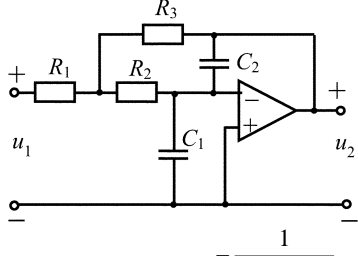
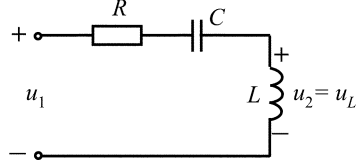
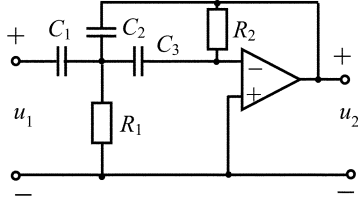
Многие активные RC (ARC)-цепи имеют частотные характеристики, свойственные колебательным контурам, поэтому могут рассматриваться как электронные аналоги колебательных контуров. В табл. 4.3.1 для каждой схемы последовательного RLC -контура в зависимости от вида нагрузки приведена определенная схема ARC -цепи и соответствующая ей комплексная передаточная функция.

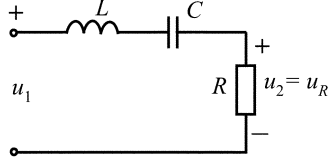
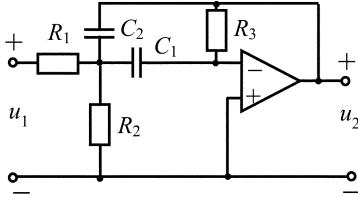
Выберите в табл. 4.3.2 для своего варианта номер схемы RLC -контура и соответствующей ARC -цепи из табл. 4.3.1;

Таблица 4.3.2

Вариант	Номер схемы из табл. 4.3.1	Вариант	Номер схемы из табл. 4.3.1
4.3.0	1	4.3.13	2
4.3.1	2	4.3.14	3
4.3.2	3	4.3.15	1
4.3.3	1	4.3.16	2
4.3.4	2	4.3.17	3
4.3.5	3	4.3.18	1
4.3.6	1	4.3.19	2
4.3.7	2	4.3.20	3
4.3.8	3	4.3.21	1
4.3.9	1	4.3.22	2
4.3.10	2	4.3.23	3
4.3.11	3	4.3.24	1
4.3.12	1	4.3.25	2

Таблица 4.3.1

№ схемы	Последовательный колебательный <i>RLC</i> -контур	Электронный аналог – <i>ARC</i> -цепь второго порядка
1	 $H_C(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{U}} = \frac{\frac{1}{LC}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$	 $H_{ARC}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{-\omega^2 + j\omega \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_3 C_1} \right) + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}}.$ <p>Положить $R_1 = R_2 = R_3 = R$, задать величину $R = 100$ кОм, рассчитать C_1 и C_2</p>
2	 $H_L(j\omega) = \frac{\dot{U}_L}{\dot{U}} = \frac{-\omega^2}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$	 $H_{ARC}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\omega^2 \frac{C_1}{C_2}}{-\omega^2 + j\omega \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_2 C_3 R_2} + \frac{1}{C_2 C_3 R_1 R_2}}.$ <p>Положить $C_1 = C_2 = C_3 = C$, задать величину $C = 1$ нФ, рассчитать R_1 и R_2</p>

№ схемы	Последовательный колебательный <i>RLC</i> -контур	Электронный аналог – <i>ARC</i> -цепь второго порядка
3	 $H_R(j\omega) = \frac{\dot{U}_R}{\dot{U}} = \frac{j\omega \frac{R}{L}}{-\omega^2 + j\frac{\omega R}{L} + \frac{1}{LC}}$	 $H_{ARC}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{-j\omega \frac{1}{R_1 C_2}}{-\omega^2 + j\omega \left(\frac{1}{R_3 C_1} + \frac{1}{R_3 C_2} \right) + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \frac{1}{R_3 C_1 C_2}}$ <p>Положить $C_1 = C_2 = C$, задать величину $C = 1$ нФ, рассчитать R_1, R_2, R_3</p>

При выполнении задач 4.3.0–4.3.25 рекомендуется следующая последовательность действий:

- запишите выбранную комплексную передаточную функцию RLC -цепи с числовыми коэффициентами, рассчитанными в задаче 4.2 своего варианта;
- рассчитайте с учетом рекомендаций в табл. 4.3.2 параметры R или C ARC -цепи таким образом, чтобы комплексные передаточные функции обеих цепей отличались только знаком. Для этого приравняйте коэффициенты при одинаковых степенях ω обеих функций:

$$H_{RLC}(j\omega) = H_{ARC}(j\omega);$$

- рассчитайте частотные характеристики заданной ARC -цепи в линейном масштабе на ПК с использованием программы FASTMEAN;
- сравните полученные графики АЧХ и ФЧХ ARC -цепи с соответствующими графиками в задаче 4.2 заданного RLC -контура и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Какое явление в цепи называют резонансом?
2. Каковы условия резонанса в последовательном и параллельном колебательных контурах?
3. Что такое характеристическое сопротивление контура, резонансная частота, добротность? Как определяется добротность последовательного и параллельного контуров?
4. Почему резонанс в последовательной контуре называют резонансом напряжений? Какими будут напряжения при резонансе на каждом из элементов контура по сравнению с приложенным?
5. Чему равно входное сопротивление последовательного контура при резонансе? Чему равен сдвиг по фазе между током и напряжением на входных зажимах контура при резонансе?
6. Почему резонанс в параллельном контуре называют резонансом тока? Какими будут токи при резонансе в каждом из элементов контура по сравнению с током источника?
7. Чему равно входное сопротивление параллельного контура при резонансе?
8. Что называют полосой пропускания контура?

9. Как ширина полосы пропускания контура зависит от его добротности?

10. Что понимают под избирательностью контура? От чего она зависит?

11. При каких значениях Q колебательный контур считается высокодобротным?

12. Почему ARC -цепь может рассматриваться как электронный аналог колебательного RLC -контура?

13. Каковы преимущества применения ARC -цепей в качестве электронных аналогов колебательных RLC -контуров?

14. Применимы ли понятия резонанса напряжений и резонанса токов к электронным аналогам колебательных RLC -контуров?

5. ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКИ.

УРАВНЕНИЯ ПЕРЕДАЧИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ. СОБСТВЕННЫЕ И ХАРАКТЕРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Четырехполосником называют электрическую цепь любой сложности, имеющую две пары внешних зажимов. Подобные ЭЦ предназначены для передачи электрических сигналов от генератора к нагрузке и включены таким образом, что через входные и выходные зажимы проходят попарно равные токи, положительные направления которых показаны на рис. 5.1.

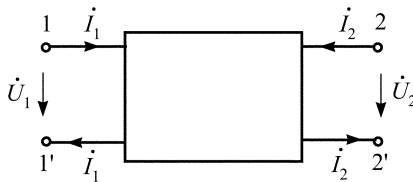


Рис. 5.1

Соотношения, связывающие комплексные напряжения и токи на двух парах зажимов четырехполосника, называют уравнениями передачи четырехполосника.

Коэффициенты уравнений передачи четырехполосника называют собственными или внутренними параметрами, так как они определяются только его схемой и значениями элементов и не зависят от внешних цепей, между которыми включен четырехполосник.

Различают пять форм записи уравнений передачи четырехполосника и собственно пять видов его параметров. Такой подход определяется пятью видами соединений четырехполосников: последовательное, параллельное, каскадное, последовательно-параллельное и параллельно-последовательное.

Уравнения передачи четырехполосника в обычной и матричной формах записи имеют вид:

- через Z -параметры (параметры сопротивлений, холостого хода)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2, \\ \dot{U}_2 = Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2, \end{cases} \quad \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix};$$

- через Y -параметры (параметры проводимостей, короткого замыкания)

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2, \end{cases} \quad \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix};$$

- через A -параметры (обобщенные или каскадные параметры)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A_{11}\dot{U}_1 + A_{12}(-\dot{I}_2), \\ \dot{I}_2 = A_{21}\dot{U}_1 + A_{22}(-\dot{I}_2), \end{cases} \quad \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ -\dot{I}_2 \end{pmatrix}.$$

A -параметры применяются при каскадном соединении четырехполюсников, когда выходные зажимы первого четырехполюсника соединяются с входными зажимами второго.

$$A_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_2=0} \quad \text{– коэффициент передачи по напряжению в режиме}$$

холостого хода,

$$A_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{– передаточное сопротивление (Ом),}$$

$$A_{21} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2} \right|_{\dot{I}_2=0} \quad \text{– передаточная проводимость (Сим),}$$

$$A_{22} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{– коэффициент передачи по току в режиме короткого}$$

замыкания;

- через H -параметры

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 = H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2, \end{cases} \quad \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix};$$

H -параметры применяются при рассмотрении схем с биполярными транзисторами.

$$H_{11} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad \text{– входное сопротивление (Ом),}$$

$$H_{12} = \left. \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right|_{i_1=0} \quad - \text{коэффициент обратной передачи (обратной связи)}$$

по напряжению,

$$H_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} \right|_{\dot{U}_2=0} \quad - \text{коэффициент прямой передачи (управления) по току,}$$

$$H_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} \right|_{i_1=0} \quad - \text{выходная проводимость (Сим);}$$

- через F -параметры

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = F_{11}\dot{U}_1 + F_{12}\dot{I}_2, \\ \dot{U}_2 = F_{21}\dot{U}_1 + F_{22}\dot{I}_2, \end{cases} \quad \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}.$$

5.1. Собственные H -параметры и A -параметры четырехполюсника

[1, с. 307–315; 2, с. 294–301]

При выполнении задач 5.1.0–5.1.25 рекомендуется следующая последовательность действий:

- определите в табл. 5.1.1 в соответствии с номером варианта код, каждая цифра которого обозначает номер схемы четырехполюсника;

Таблица 5.1.1

Вариант	5.1.0	5.1.1	5.1.2	5.1.3	5.1.4	5.1.5	5.1.6	5.1.7
Код	3, 2, 5	2, 7	7, 3	8, 4	5, 9	8, 2	7, 5	3, 8
Вариант	5.1.8	5.1.9	5.1.10	5.1.11	5.1.12	5.1.13	5.1.14	5.1.15
Код	9, 4	3, 9	1, 9	4, 7	9, 6	1, 8	5, 8	7, 1
Вариант	5.1.16	5.1.17	5.1.18	5.1.19	5.1.20	5.1.21	5.1.22	5.1.23
Код	9, 2	2, 0	6, 7	6, 0	8, 6	0, 1	4, 0	0, 5
Вариант	5.1.24	5.1.25						
Код	0, 3	1, 6, 3						

- выберите в табл. 5.1.2 для каждой цифры кода схему простейшего четырехполюсника и постройте заданный четырехполюсник путем каскадного соединения двух или трех простейших, учитывая, что порядок их соединения определяется порядком цифр в коде; покажите направления комплексных токов и напряжений на внешних зажимах четырехполюсника (рис. 5.1).

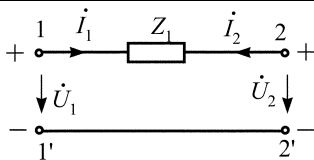
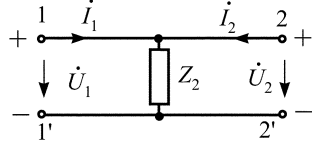
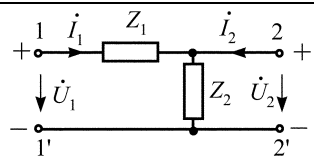
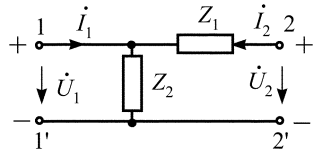
Таблица 5.1.2

Цифра кода	Схема простейшего четырехполюсника	Цифра кода	Схема простейшего четырехполюсника
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	
5		10	

- определите по схеме и уравнениям H -параметры заданного четырехполюсника и укажите их размерность;

- определите A -параметры заданного четырехполюсника путем перемножения матриц A -параметров простейших четырехполюсников, приведенных в табл. 5.1.3, причем матрицы в произведении должны располагаться в том же порядке, в котором входят в соединение соответствующие четырехполюсники.

Таблица 5.1.3

Схема простейшего четырехполюсника	Матрица A -параметров
	$(A) = \begin{pmatrix} 1 & Z_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
	$(A) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_2} & 1 \end{pmatrix}$
	$(A) = \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_2} & Z_1 \\ \frac{1}{Z_2} & 1 \end{pmatrix}$
	$(A) = \begin{pmatrix} 1 & Z_1 \\ \frac{1}{Z_2} & 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \end{pmatrix}$

Определите по полученным A -параметрам заданного четырехполюсника H -параметры, используя известные соотношения между A - и H -параметрами, и сравните их с полученными по схеме:

$$(H) = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{A_{12}}{A_{22}} & \frac{\Delta A}{A_{22}} \\ -\frac{1}{A_{22}} & \frac{A_{21}}{A_{22}} \end{pmatrix},$$

где $\Delta A = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$ для взаимных четырехполюсников.

5.2. Характеристические параметры четырехполюсника

[1, с. 415–417; 2, с. 310–319]

При передаче сигнала от генератора к нагрузке наиболее благоприятным является режим согласованного включения четырехполюсника (рис. 5.2). В случае каскадного соединения нескольких четырехполюсников обеспечивается согласованное включение каждого из них. При таком включении отсутствуют отражения электрической энергии на входе и выходе четырехполюсника и искажение сигнала.

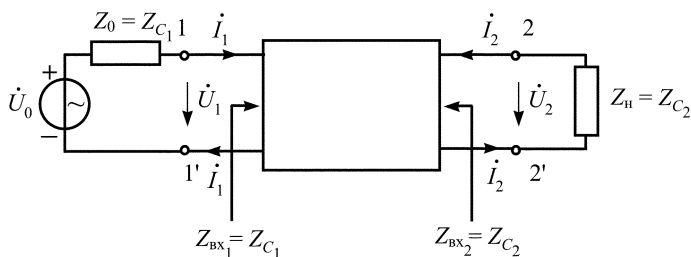


Рис. 5.2

В согласованном режиме включения качество передачи энергии через четырехполюсник определяется характеристическими параметрами: характеристическими сопротивлениями в прямом Z_{c1} и обратном Z_{c2} направлениях передачи и характеристической постоянной передачи $g_c = a_c + jb_c$.

Входное сопротивление равно Z_{c1} , если четырехполюсник нагружен со стороны зажимов 2, 2' сопротивлением $Z_{н} = Z_{c2}$ (рис. 5.3), и рассчитывается через сопротивления холостого хода и короткого замыкания

$$Z_{c1} = \sqrt{Z_{кз1} Z_{хх1}}.$$

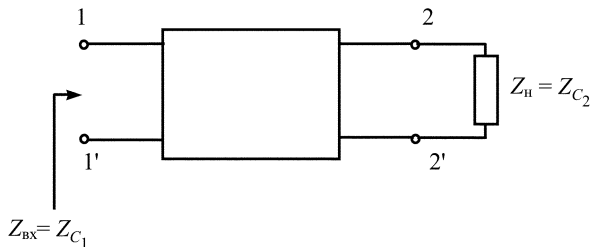


Рис. 5.3

Входное сопротивление равно Z_{c2} , если четырехполюсник нагружен со стороны зажимов 1, 1' сопротивлением $Z_H = Z_{c1}$ (рис. 5.4), и рассчитывается $Z_{c2} = \sqrt{Z_{кз2} Z_{хх2}}$.

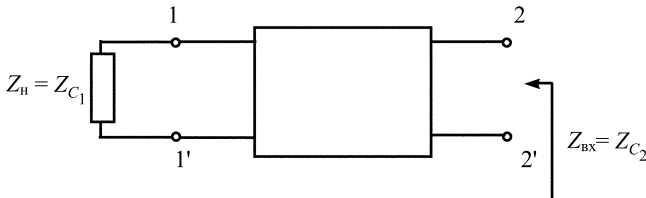


Рис. 5.4

Для симметричного четырехполюсника $Z_{c1} = Z_{c2}$.

Характеристическая постоянная передачи определяется так:

$$g_c = \frac{1}{2} \ln \frac{\dot{U}_1 \dot{I}_1}{\dot{U}_2 \dot{I}_2} = a_c + jb_c,$$

где a_c – характеристическое затухание, дБ,
 b_c – характеристическая фазовая постоянная.
 Удобно пользоваться выражениями:

$$g_c = \ln \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} + \ln \sqrt{\frac{Z_{c1}}{Z_{c2}}};$$

$$g_c = \ln \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} + \ln \sqrt{\frac{Z_{c2}}{Z_{c1}}},$$

особенно для симметричных четырехполюсников, когда $Z_{c1} = Z_{c2}$.

При выполнении задач 5.2.0–5.2.25 рекомендуется следующая последовательность действий:

- найдите выражения для характеристических сопротивлений Z_{c1} и Z_{c2} через сопротивления холостого хода и короткого замыкания для полученного в задачах 5.1.0–5.1.25 четырехполюсника своего варианта;
- составьте схему сложного симметричного четырехполюсника (рис. 5.5) из двух одинаковых четырехполюсников, первым в соединении поставьте четырехполюсник своего варианта из задачи 5.1;

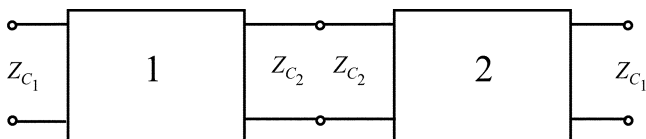


Рис. 5.5

• нарисуйте схему согласованного включения полученного симметричного четырехполюсника между генератором \dot{U}_0 , Z_0 и нагрузкой Z_H и запишите выражения для сопротивлений Z_0 , Z_H , $Z_{вх1}$, тока \dot{I}_1 и напряжений \dot{U}_1 на его входе.

Контрольные вопросы

1. Какая электрическая цепь называется четырехполюсником?
2. Что называется уравнениями передачи четырехполюсника, и какие формы этих уравнений возможны?
3. Какие параметры четырехполюсника называются собственными или внутренними?
4. Какие виды собственных параметров четырехполюсника известны?
5. Какое включение четырехполюсника называется согласованным?
6. Какие параметры четырехполюсника называются характеристическими?
7. Как рассчитываются характеристические сопротивления четырехполюсника?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий, А. Ф. Теория линейных электрических цепей : учебник. – 2-е изд. / А. Ф. Белецкий. – СПб. : Издательство «Лань», 2009. – 544 с.
2. Бакалов, В. П. Основы теории цепей : учебник для вузов ; 3-е изд. / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. Н. Крук. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 596 с.

**Логвинова Нина Константиновна
Зайцева Зинаида Викторовна**

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
Анализ стационарных колебаний
в линейных электрических цепях

Практикум
Часть 1

Ответственный редактор *Н. К. Логвинова*

Редактор *Л. А. Медведева*

Верстка *Н. А. Ефремовой*

План 2013 г., п. 188

Подписано к печати 13.05.2013
Объем 5,5 усл.-печ. л. Тираж 120 экз. Заказ 369
РИЦ СПбГУТ. 191186 СПб., наб. р. Мойки, 61

Отпечатано в СПбГУТ

