

Министерство образования Российской Федерации
ГОУ УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ-УПИ

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Методические указания и задания для самостоятельной работы
по дисциплинам «Основы теории цепей», «Теория электрических цепей»
для студентов дневной формы обучения специальностей:
200700 – Радиотехника, 201600 - Радиоэлектронные системы,
075600 - Информационная безопасность телекоммуникационных систем

ЕКАТЕРИНБУРГ 2001

УДК 621.3.01

Составитель Т. М. Лысенко

Научный редактор доц., канд. техн. наук А.С. Лучинин

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ: Методические указания и задания для самостоятельной работы по дисциплинам «Основы теории цепей», «Теория электрических цепей» /Т.М. Лысенко. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. 25 с.

Приводятся варианты индивидуальных домашних заданий и задания на расчетно-графическую работу, выполнение которых в значительной степени способствует освоению методов теории цепей.

Библиогр.: 12 назв. Рис. 12. Табл. 13.

Подготовлено кафедрой теоретических основ радиотехники.

© Уральский государственный
технический университет - УПИ, 2001

ВВЕДЕНИЕ

Радиоэлектроника как область науки и техники решает широкий круг задач, связанных с использованием электрических явлений для передачи и обработки информации. К ним в первую очередь относятся задачи связи, радиолокации и радионавигации. Электромагнитные явления и радиоэлектронные устройства на их основе можно достаточно строго описать методами теории электромагнитного поля с помощью дифференциальных уравнений в частных производных (уравнений Максвелла).

При использовании методов теории цепей реальные элементы радиоэлектронных устройств заменяются их упрощенными моделями, построенными из идеализированных элементов. При замене каждого реального элемента электрической цепи его упрощенной моделью получают идеализированную или моделирующую цепь. При построении моделирующих цепей используют пять основных типов идеализированных двухполюсных элементов (идеальные резистор, конденсатор, индуктивная катушка, источник напряжения и источник тока). Кроме двухполюсных идеализированных элементов используют многополюсные - управляемые источники тока и напряжения, идеальные трансформаторы и др. Характер соединений между идеализированными элементами моделирующей цепи определяет ее топологические свойства, для описания которых используют понятия ветви, узла и контура из теории графов.

Математическое описание процессов в моделирующих цепях базируется на уравнениях двух типов: компонентных и топологических. Топологические уравнения устанавливают связь между токами и напряжениями различных ветвей. Компонентные уравнения представляют собой математические модели соответствующих ветвей и устанавливают связь между током и напряжением в отдельных ветвях. Если компонентные уравнения всех ветвей цепи являются линейными (алгебраическими, дифференциальными или интегральными), то моделирующая цепь является линейной.

Теория линейных электрических цепей является важной составной частью ряда базовых дисциплин, таких как «Основы теории цепей» (специальности 200700 и 201600), «Теория электрических цепей» (специальности 075600). В соответствии с требованиями государственного образовательного стандарта инженер должен:

- *иметь представление:*
 - о современных методах и средствах расчета электрических цепей;
- *знать и уметь использовать:*
 - фундаментальные положения радиоэлектроники, важнейшие свойства и характеристики электрических цепей, методы расчета цепей во временной и частотной областях;
- *иметь опыт:*
 - аналитического и численного анализа электрических цепей во временной и частотной областях при разнообразных воздействиях.

Известно, что половина всех часов, отводимая государственным образовательным стандартом на изучение той или иной дисциплины, должна быть реализована в форме самостоятельной работы студента. Выполнение индивидуальных домашних заданий и расчетных работ, предложенных в настоящем сборнике заданий, позволит студентам закрепить пройденный на аудиторных занятиях материал и послужит хорошей основой для отличной сдачи экзамена. Для выполнения заданий рекомендуется использовать учебники и учебные пособия [1-12]. Исходные данные для выполнения индивидуального задания выбираются студентом самостоятельно по двум числам **m** и **n**:

- ◆ **m** - номер группы на потоке (например, для группы Р - 119 $m = 9$);
- ◆ **n** - порядковый номер фамилии студента в списке группы.

1. Уравнения электрического равновесия цепи

Домашнее задание № 1

Анализируемая схема строится каждым студентом самостоятельно в соответствии с графом схемы электрической цепи (рис. 1.1) и кодом, заданным вариантом n (табл. 1.1).

Первая цифра кода указывает номер ветви, в которую включен идеальный источник напряжения (ИИН); ориентация источника выбирается самостоятельно. **Вторая** цифра указывает номер ветви, в которую включен идеальный источник тока (ИИТ); ориентация источника выбирается самостоятельно. **Третья и четвертая** цифры указывают номера ветвей, в каждую из которых включены последовательно индуктивность и сопротивление. **Пятая и шестая** цифры указывают номера ветвей, в каждую из которых включены последовательно емкость и сопротивление. В остальные ветви включены сопротивления.

В задании требуется:

1. Построить схему цепи, обозначить элементы и задать направления токов ветвей.
2. Записать компонентные уравнения невырожденных ветвей, содержащих идеализированные пассивные элементы, в виде $u_k = f(i_k)$, $k = 1, 2, \dots, 6$.
3. Выбрать дерево графа так, чтобы ветвь, содержащая ИИТ, вошла в состав главных ветвей. Построить систему главных контуров. Записать для каждого главного контура уравнения баланса напряжений ветвей.
4. Выбрать в качестве базисного узла один из узлов цепи, которому инцидентна ветвь, содержащая ИИН. Составить уравнения баланса токов в независимых узлах.
5. Записать топологические матрицы: структурную, главных контуров, главных сечений.
6. Записать в матричной форме топологические уравнения, составленные по первому и второму законам Кирхгофа. Сверить результаты, полученные в п. 3, 4 и 6.

Таблица 1.1

Вариант	Код	Вариант	Код	Вариант	Код	Вариант	Код
1	124563	9	345627	17	784563	25	235641
2	245631	10	213456	18	845637	26	512346
3	627845	11	372456	19	612345	27	647235
4	563124	12	834567	20	578346	28	472356
5	631245	13	456378	21	356412	29	564723
6	312456	14	134562	22	657834	30	723564
7	278456	15	678345	23	465783	31	356478
8	734562	16	723456	24	412356	32	564783

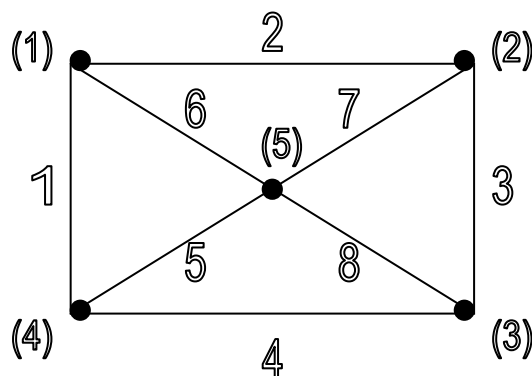


Рис. 1.1. Ненаправленный граф схемы электрической цепи

2. Векторные диаграммы простейших цепей

Домашнее задание № 2

Векторные диаграммы токов и напряжений простейших цепей показаны на рис. 2.1. Амплитуда S_{m1} относится к сопротивлению R , а амплитуда S_{m2} – к реактивному элементу (индуктивности L или ёмкости C). На всех векторных диаграммах дугой и точкой обозначен прямой угол.

Для каждого варианта n в табл. 2.1 указаны два рисунка. Считать, что на первом рисунке показана векторная диаграмма напряжений (диаграмма 1), на втором – векторная диаграмма токов (диаграмма 2).

В задании требуется:

1. Построить схему цепи, соответствующую векторной диаграмме 1.
2. Определить комплексное входное сопротивление цепи. Указать, чему равен модуль и аргумент входного сопротивления при частоте $\omega \rightarrow \infty$ и $\omega \rightarrow 0$.
3. Построить схему цепи, соответствующую векторной диаграмме 2.
4. Определить комплексное входное сопротивление цепи. Указать, чему равен модуль и аргумент входного сопротивления двухполюсника при частоте $\omega \rightarrow \infty$ и $\omega \rightarrow 0$.

Таблица 2.1

Вариант, n	Векторная диаграмма 1 (S_m, S_{m1}, S_{m2} - амплитуды напряжений)	Векторная диаграмма 2 (S_m, S_{m1}, S_{m2} - амплитуды токов)
1	Рис. 2.1, а	Рис. 2.1, и
2	Рис. 2.1, б	Рис. 2.1, з
3	Рис. 2.1, е	Рис. 2.1, г
4	Рис. 2.1, з	Рис. 2.1, б
5	Рис. 2.1, и	Рис. 2.1, а
6	Рис. 2.1, в	Рис. 2.1, м
7	Рис. 2.1, г	Рис. 2.1, л
8	Рис. 2.1, д	Рис. 2.1, к
9	Рис. 2.1, ж	Рис. 2.1, з
10	Рис. 2.1, к	Рис. 2.1, д
11	Рис. 2.1, л	Рис. 2.1, г
12	Рис. 2.1, м	Рис. 2.1, в
13	Рис. 2.1, а	Рис. 2.1, в
14	Рис. 2.1, б	Рис. 2.1, г
15	Рис. 2.1, е	Рис. 2.1, д
16	Рис. 2.1, з	Рис. 2.1, ж
17	Рис. 2.1, и	Рис. 2.1, к
18	Рис. 2.1, к	Рис. 2.1, б
19	Рис. 2.1, л	Рис. 2.1, е
20	Рис. 2.1, м	Рис. 2.1, з

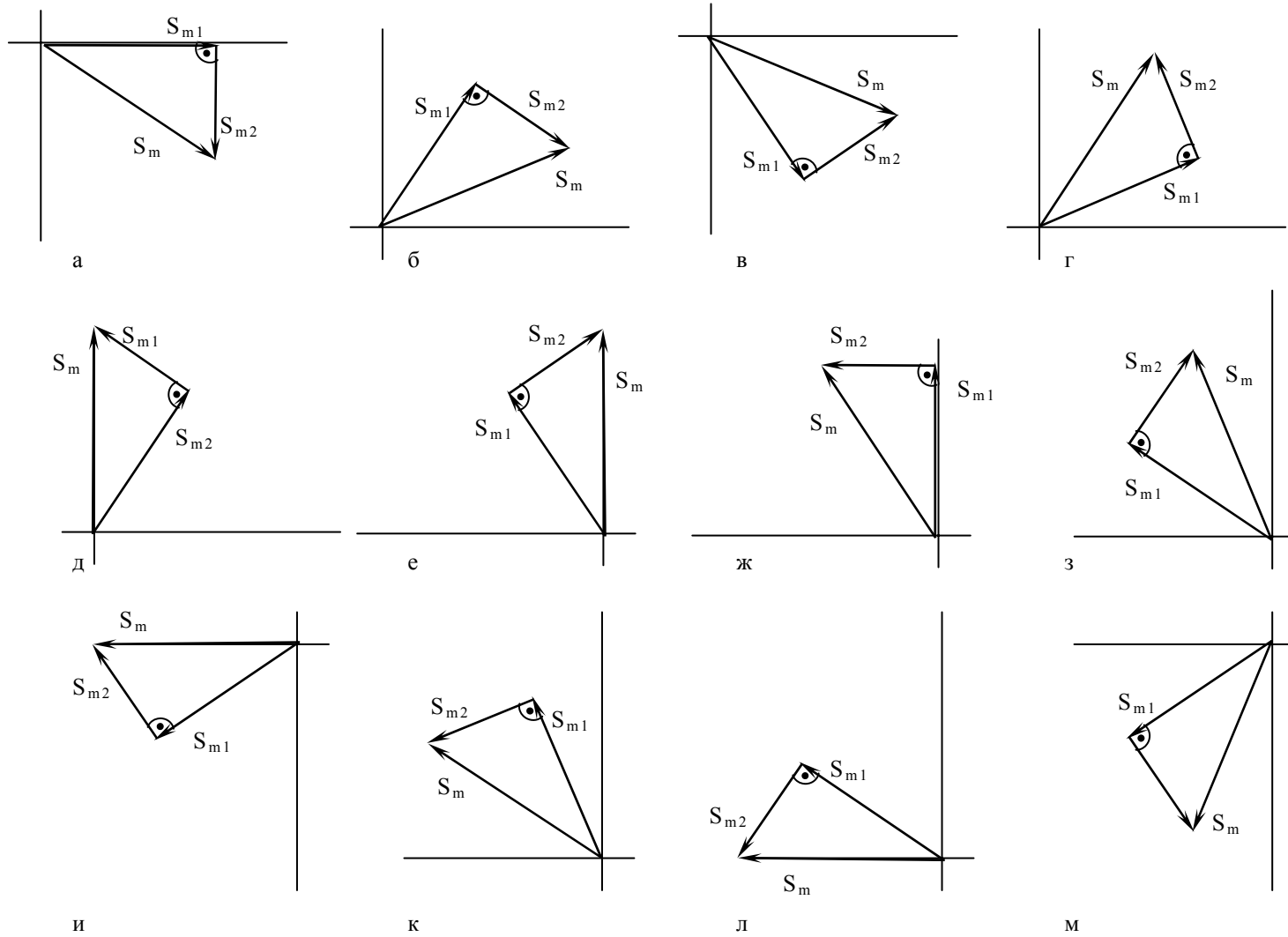


Рис. 2.1. Векторные диаграммы

3. Метод комплексных амплитуд

Домашнее задание № 3

Идеальный источник гармонического напряжения подключен к входу цепи, схема которой приведена на рис. 3.1.

В задании требуется:

1. Построить в соответствии с вариантом (**n**) эквивалентную схему цепи (табл. 3.1).
Величины индуктивности, емкости и сопротивления в **k** - й ветви цепи рассчитываются по формулам

$$L_k = n k, \quad \text{мГн}, \quad C_k = 1/(2n k), \quad \text{мкФ}, \quad R_k = 2 n k, \quad \text{Ом}.$$

2. Считая, что известно напряжение (или ток) на элементе схемы, указанном для данного варианта (табл. 3.1):

$$a(t) = n \cos(n 10^6 t + 2(-1)^n \pi/n), \quad [\text{В}] \text{ или } [\text{мА}],$$

рассчитать комплексные амплитуды токов I_1, I_2, I_3 и комплексные амплитуды напряжений U_1, U_2, U . Ответы записать в двух формах: алгебраической и показательной (аргумент в градусах).

3. Проверить выполнение условия баланса комплексных мощностей.
4. Рассчитать комплексное входное сопротивление цепи двумя способами.
5. Построить по результатам расчетов векторную диаграмму токов.
6. Построить по результатам расчетов векторную диаграмму напряжений.
7. Найти мгновенные значения токов $i_1(t), i_2(t), i_3(t)$ и напряжений $u_1(t), u_2(t), u(t)$.

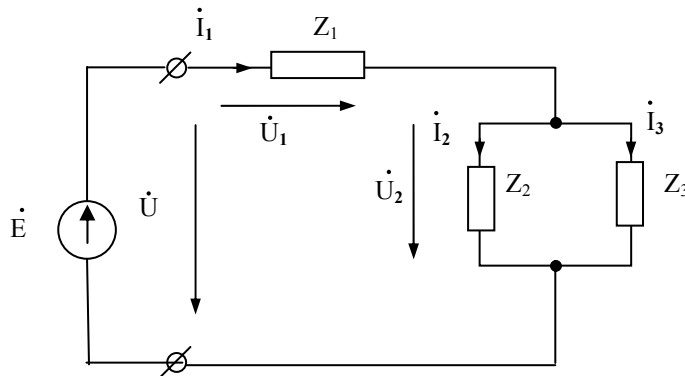


Рис. 3.1. Схема цепи

Таблица 3.1

Вариант, n	Z_1	Z_2	Z_3	$a(t)$
1	$R_1 C_1$ парал.	$R_2 C_2$ посл.	L_3	i_{R2}
2	$R_1 L_1$ посл.	$R_2 L_2$ парал.	C_3	u_{L2}
3	$R_1 L_1$ парал.	$R_2 C_2$ посл.	R_3	i_{R3}
4	$R_1 L_1$ посл.	$R_2 C_2$ парал.	L_3	u_{L1}
5	$R_1 C_1$ посл.	$R_2 L_2$ парал.	C_3	i_{R2}
6	L_1	$R_2 C_2$ посл.	$R_3 C_3$ парал.	i_{R2}
7	C_1	$R_2 L_2$ парал.	$R_3 L_3$ посл.	u_{L2}
8	C_1	$R_2 L_2$ посл.	$R_3 L_3$ парал.	i_{R3}
9	L_1	$R_2 C_2$ парал.	$R_3 L_3$ посл.	u_{L3}
10	R_1	$R_2 L_2$ посл.	$R_3 C_3$ парал.	i_{R2}
11	$R_1 C_1$ парал.	L_2	$R_3 C_3$ посл.	i_{R3}
12	$R_1 L_1$ посл.	R_2	$R_3 C_3$ парал.	u_{L1}
13	$R_1 L_1$ парал.	R_2	$R_3 C_3$ посл.	i_{R2}
14	$R_1 L_1$ посл.	L_2	$R_3 C_3$ парал.	u_{C3}
15	$R_1 C_1$ парал.	R_2	$R_3 L_3$ посл.	i_{R3}
16	$R_1 L_1$ посл.	$R_2 C_2$ парал.	R_3	i_{R2}
17	$R_1 C_1$ парал.	$R_2 L_2$ посл.	R_3	u_{C1}
18	$R_1 C_1$ посл.	$R_2 L_2$ парал.	L_3	i_{R2}
19	$R_1 C_1$ парал.	$R_2 L_2$ посл.	C_3	u_{C3}
20	$R_1 L_1$ посл.	$R_2 C_2$ парал.	L_3	i_{L3}
21	$R_1 L_1$ парал.	L_2	$R_3 C_3$ посл.	i_{L2}
22	$R_1 C_1$ посл.	R_2	$R_3 L_3$ парал.	u_{C1}
23	$R_1 C_1$ парал.	R_2	$R_3 C_3$ посл.	i_{R2}
24	$R_1 L_1$ посл.	C_2	$R_3 C_3$ парал.	u_{C3}
25	$R_1 C_1$ парал.	R_2	$R_3 L_3$ посл.	u_{C1}
26	$R_1 C_1$ посл.	$L_2 C_2$ парал.	L_3	i_{L2}
27	$R_1 L_1$ парал.	$R_2 C_2$ посл.	C_3	u_{C2}
28	$R_1 C_1$ посл.	$R_2 L_2$ парал.	R_3	i_{R3}
29	$R_1 C_1$ парал.	$R_2 C_2$ посл.	L_3	u_{C2}
30	$R_1 L_1$ посл.	$R_2 L_2$ парал.	C_3	u_{L2}

4. Метод контурных токов и метод узловых напряжений

Домашнее задание № 4

Построить эквивалентную схему электрической цепи, если граф схемы приведен на рис. 1.1, а идеализированные элементы, входящие в состав k -й ветви, задаются вариантом n и кодом (табл. 4.1).

Первая цифра кода указывает номер ветви, в которую включен идеальный источник гармонического напряжения; ориентация источника выбирается самостоятельно. **Вторая** цифра кода указывает номер ветви, в которую включен идеальный источник гармонического тока, ориентация источника выбирается самостоятельно. **Третья и четвертая** цифры кода указывают номера ветвей, в которые включены индуктивности. **Пятая и шестая** цифры указывают номера ветвей, в которые включены емкости. **В остальные** ветви включены сопротивления. Направления токов ветвей выбираются

самостоятельно. Частота, действующие значения и начальные фазы идеальных источников известны:

$$\omega = n \cdot 10^6, \text{ рад/с}, E = 1 \text{ В}, \psi_E = 2 \cdot n, \text{ град}, J = 1 \text{ мА}, \psi_J = -2 \cdot n, \text{ град}.$$

Известны параметры элементов цепи в k -й ветви:

$$R_k = n \cdot k, \text{ Ом}, C_k = 1/(n \cdot k), \text{ мкФ}, L_k = n \cdot k, \text{ мкГн}.$$

В задании требуется:

Построить комплексную схему замещения цепи. Комплексные сопротивления ветвей, содержащих идеализированные пассивные элементы, обозначить как Z_k , где k – номер соответствующей ветви в графе схемы.

Метод узловых напряжений

1. Выбрать базисный узел (0) с учетом расположения ветви с источником напряжения (остальные узлы переобозначить). Указать на схеме узловые напряжения.
2. Записать в канонической форме систему узловых уравнений для определения трех неизвестных узловых напряжений.
3. Выразить неизвестные токи ветвей через узловые напряжения.
4. Записать узловые уравнения в канонической форме для частного случая, когда источник тока является линейно управляемым: $J = k_{упр} E$.

Метод контурных токов

1. Выбрать дерево графа с учетом расположения ветви с идеальным источником тока и построить систему главных контуров. Записать состав главных контуров.
2. Записать в канонической форме систему контурных уравнений для определения трех неизвестных контурных токов.
3. Выразить неизвестные токи ветвей через контурные токи.
4. Записать контурные уравнения в канонической форме для частного случая, когда источник напряжения является линейно управляемым: $E = k_{упр} J$.
5. Записать контурные уравнения в канонической форме для случая двух связанных индуктивностей. Одноименные зажимы выбрать произвольно. Рассчитать взаимную индуктивность M , если коэффициент связи между индуктивными катушками $k_M = 0,8$.

Таблица 4.1

Вариант, n	Код	Вариант, n	Код	Вариант, n	Код	Вариант, n	Код
1	124563	9	345627	17	784563	25	235641
2	245631	10	213456	18	845637	26	512346
3	627845	11	372456	19	612345	27	647235
4	563124	12	834567	20	578346	28	472356
5	631245	13	456378	21	356412	29	564723
6	312456	14	134562	22	657834	30	723564
7	278456	15	678345	23	465783	31	356478
8	734562	16	723456	24	412356	32	564783

5. Метод наложения и теорема об эквивалентном источнике

Домашнее задание № 5

Построить эквивалентную схему электрической цепи, если граф схемы приведен на рис. 1.1, а идеализированные элементы, входящие в состав k -й ветви, задаются вариантом n и кодом (табл. 4.1).

Первая цифра кода указывает номер ветви, в которую включен идеальный источник гармонического тока частоты ω ; ориентация источника выбирается самостоятельно. **Вторая** цифра указывает номер ветви, в которую включен идеальный источник гармонического напряжения той же частоты ω ; ориентация источника выбирается самостоятельно. **Третья и четвертая** цифры указывают номера ветвей, в которые включены индуктивности. **Пятая и шестая** цифры указывают номера ветвей, в которые включены емкости. **В остальные** ветви включены сопротивления.

Направления токов ветвей выбираются произвольно. Комплексные сопротивления ветвей, содержащих идеализированные пассивные элементы, обозначить как Z_k , где k – номер соответствующей ветви в графе схемы.

В задании требуется:

1. Используя метод наложения, определить ток, протекающий через идеальный источник напряжения.
2. Используя теорему об эквивалентном источнике (последовательная схема замещения), найти ток, протекающий через идеальный источник напряжения.
3. Используя теорему об эквивалентном источнике (параллельная схема замещения), найти напряжение на идеальном источнике тока.
4. Найти комплексное сопротивление Z_k любой невырожденной ветви цепи, при котором активная мощность, поступающая в k – ю ветвь, будет наибольшей в данной схеме.

6. Комплексные частотные характеристики цепи

Домашнее задание № 6

Построить эквивалентную схему электрической цепи, если граф схемы приведен на рис. 6.1. Номер графа схемы определяется как остаток от деления номера варианта n на 3. Идеализированные элементы, входящие в состав k -й ветви, задаются вариантом n и табл. 6.1. В нулевую ветвь включается идеальный источник гармонического напряжения частоты ω , а в десятую – нагрузка R_n .

Параметры элементов цепи известны:

$$R_1 = n, \text{ Ом}, R_2 = n \cdot 10^3, \text{ Ом}, R_3 = 2n, \text{ Ом}, R_4 = n \cdot 10^4, \text{ Ом}, R_5 = 5n, \text{ Ом}, \\ C = n \cdot 10^{-2}, \text{ мкФ}, L = n \cdot 10, \text{ мГн}, R_n = n \cdot 10^3, \text{ Ом}.$$

В задании требуется:

1. Найти комплексное входное сопротивление цепи относительно зажимов источника, его АЧХ и ФЧХ. Рассчитать и построить графики АЧХ и ФЧХ не менее чем на десяти частотах, включая 0 и ∞ .
2. Найти комплексный коэффициент передачи цепи по напряжению, его АЧХ и ФЧХ. Рассчитать и построить графики АЧХ и ФЧХ не менее чем на десяти частотах, включая 0 и ∞ .

Таблица 6.1

Вариант	Элементы ветвей								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	L	∞	0	R5	∞	R1	R2	R3
2	L	L	L	0	R4	∞	R3	R4	R1
3	L	L	∞	R4	0	∞	R1	R2	R1
4	R1	L	∞	∞	0	0	R1	R4	R1
5	0	L	R5	∞	0	0	R1	R2	R3
6	R3	L	R5	∞	0	0	R1	∞	R3
7	L	0	R5	∞	0	0	R3	∞	R1
8	C	0	∞	0	R4	∞	R3	R2	R1
9	C	C	C	0	R2	∞	R1	R2	R3
10	C	C	∞	R2	0	∞	R1	R4	R3
11	R1	C	R5	∞	0	0	R3	R2	R3
12	0	C	R5	∞	0	0	R3	R4	R1
13	R3	C	R5	∞	0	0	R3	∞	R1
14	C	0	R5	∞	0	0	R1	∞	R3
15	R1	0	∞	L	0	0	R2	R4	R1
16	R1	R1	R1	L	L	0	R3	R2	R1
17	R3	R1	R3	L	L	L	R1	R2	R3
18	0	R1	∞	L	R1	∞	R1	∞	R3
19	0	R1	R3	0	L	R5	R3	∞	R1
20	0	R3	∞	R1	R5	L	R1	∞	R3
21	R1	R3	∞	R1	L	∞	0	R4	0
22	R3	0	∞	C	0	0	R3	R4	R1
23	R1	R1	R1	C	C	0	R1	R4	R1
24	R1	R3	R1	C	C	C	R1	R4	R1
25	0	R1	∞	C	R3	∞	R3	∞	R1
26	0	R3	R1	0	C	R5	R1	∞	R1
27	0	R1	∞	R1	R5	C	R3	∞	R1
28	R3	R1	∞	R3	C	∞	0	R2	R2

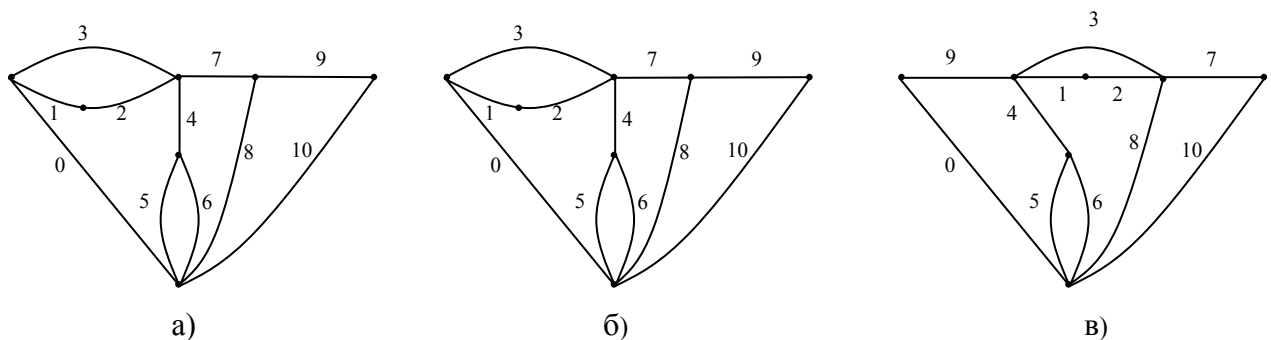


Рис. 6.1. Графы схемы цепи: а) граф № 1; б) граф № 2; в) граф № 3

7. Анализ последовательного колебательного контура

Домашнее задание № 7

Последовательная RLC – цепь подключена к идеальному источнику гармонического напряжения. Для каждого варианта в табл. 7.1 приведены цифры четырехзначного кода, которые указывают номера четырех строк из табл. 7.2. Эти строки задают входные данные варианта задания.

В задании требуется:

1. Рассчитать выходные данные, наименования которых указаны во втором столбце табл. 7.2, в строках, не вошедших в код.
2. Рассчитать нормированную резонансную кривую тока контура (при добротности, большей десяти, воспользоваться приближенной формулой). Построить рассчитанную кривую в области частот, равной двум полосам пропускания. Использовать для построения не менее десяти точек слева (справа) от резонансной частоты.
3. Рассчитать по приближенным формулам добротность, полосу пропускания контура и действующее напряжение на емкости на резонансной частоте при подключении сопротивления нагрузки параллельно емкости (n - четное) или параллельно индуктивности (n - нечетное). Сопротивление нагрузки в пятьдесят раз больше характеристического сопротивления контура.

Таблица 7.1

Вариант, n	Код	Вариант, n	Код	Вариант, n	Код	Вариант, n	Код
1	1348	9	3458	17	3459	25	1589
2	2579	10	0276	18	0134	26	0345
3	0349	11	0136	19	1368	27	2489
4	4578	12	0457	20	2349	28	0257
5	1349	13	2589	21	0124	29	1489
6	2348	14	4579	22	2368	30	2360
7	3589	15	0137	23	0234	31	1379
8	1369	16	2578	24	0279	32	0457

Таблица 7.2

Номер строки	Наименование входных (выходных) данных	Формула для расчета входных данных
0	Действующее значение тока контура на резонансной частоте	$0,1 (m+n+10)/(m+n+12), A$
1	Индуктивность контура	$10 (m+n+10), мкГ$
2	Емкость контура	$25/(m+n+10), пФ$
3	Резонансная частота	$10/(m+n+10), МГц$
4	Сопротивление потерь контура	$m+n+10, Ом$
5	Характеристическое сопротивление	$600 (m+n+10)/(m+n+12), Ом$
6	Добротность	$600/(m+n+10)$
7	Полоса пропускания	$15 (m+n+10)/(m+n+12), кГц$
8	Действующее значение входного напряжения	$0,1 (m+n+10), В$
9	Действующее напряжение на емкости на резонансной частоте	$60 (m+n+10)/(m+n+12), В$

8. Переходная и импульсная характеристики цепи

Домашнее задание № 8

Эквивалентная схема электрической цепи приведена на рис. 8.1, а параметры элементов цепи рассчитываются с помощью табл. 8.1. Для вариантов задания с номерами $n < 10$ номер схемы совпадает с номером варианта. Для вариантов задания с номерами $n > 10$ номер схемы определяется как остаток от деления n на 10 . Для каждого варианта задания параметры, указанные в табл. 8.1, должны быть увеличены в $(n + m)$ раз.

В задании требуется:

1. Определить операторный коэффициент передачи цепи по напряжению в режиме холостого хода на выходе, используя метод узловых напряжений. Входные зажимы цепи находятся слева, выходные - справа.
2. Найти значения переходной и импульсной характеристик цепи при $t=0$ и при $t = \infty$ с помощью предельных соотношений (свойства преобразования Лапласа).
3. Найти переходную и импульсную характеристики цепи и построить их графики.

Таблица 8.1

Параметры	Номер схемы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R, Ом	30	40	750	500	360	25	50	75	100	225
C, мкФ	0,5	0,1	0,02	0,03	0,04	0,6	0,3	0,2	0,15	0,1

9. Анализ неавтономного проходного четырехполюсника

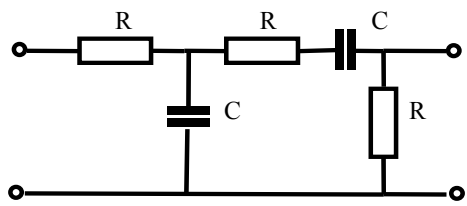
Домашнее задание № 9

Эквивалентная схема электрической цепи приведена на рис. 8.1, а параметры элементов цепи рассчитываются с помощью табл. 8.1. Для вариантов задания с номерами $n < 10$ номер схемы совпадает с номером варианта. Для вариантов задания с номерами $n > 10$ номер схемы определяется как остаток от деления n на 10 . Для каждого варианта задания параметры, указанные в табл. 8.1, должны быть увеличены в $(n + m)$ раз.

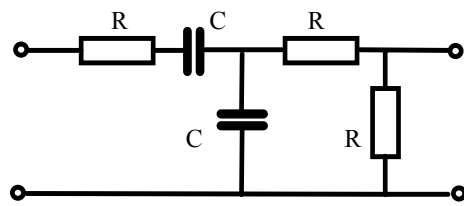
Входные зажимы четырехполюсника находятся слева, выходные – справа.

В задании требуется:

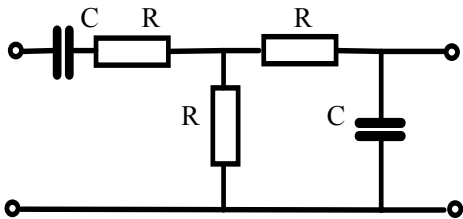
1. Определить А - параметры четырехполюсника, предварительно представив его как каскадное соединение более простых (элементарных) четырехполюсников.
2. Найти комплексные частотные характеристики четырехполюсника в прямом включении:
 - коэффициент передачи по напряжению в режиме холостого хода;
 - входное сопротивление в режиме холостого хода;
 - входное сопротивление в режиме короткого замыкания;
 - коэффициент передачи по току в режиме короткого замыкания.
3. Найти характеристические параметры четырехполюсника.
4. Найти постоянную ослабления и постоянную фазы четырехполюсника.



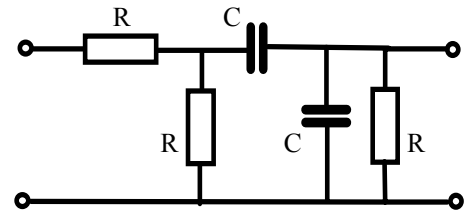
а)



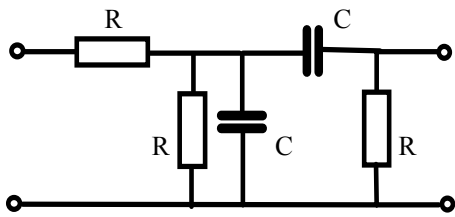
б)



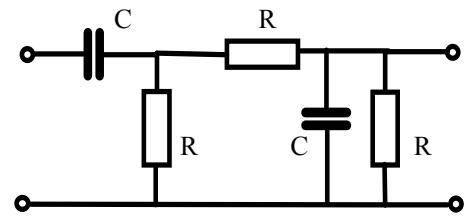
в)



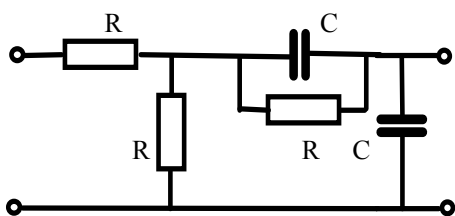
г)



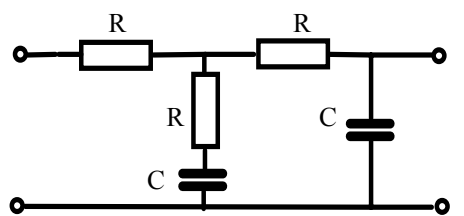
д)



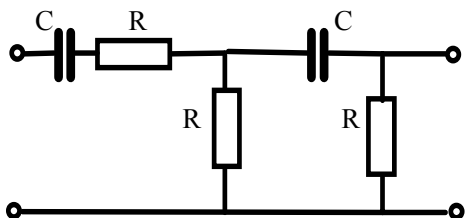
е)



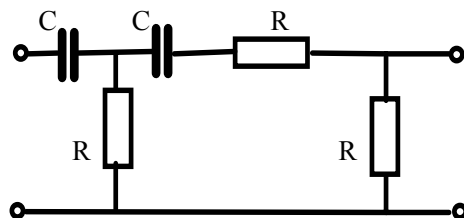
ж)



з)



и)



к)

Рис. 8.1. Эквивалентные схемы: а) схема № 1; б) схема № 2; в) схема № 3; г) схема № 4; д) схема № 5; е) схема № 6; ж) схема № 7; з) схема № 8; и) схема № 9; к) схема № 10.

10. Анализ длинной линии при гармоническом воздействии

Домашнее задание № 10

Задача 1. Четвертьволновый трансформатор (отрезок линии без потерь длиной l с погонными параметрами L_0 , C_0 и волновым сопротивлением R_B) согласовывает нагрузки R_1 и R_2 на частоте внешнего воздействия f_0 . Для каждого варианта задания n в табл. 10.1 указаны цифры четырехзначного кода. Каждая цифра кода соответствует номеру известного параметра (табл. 10.2). Необходимо по четырем известным параметрам найти оставшиеся три неизвестных параметра.

Таблица 10.1

Вариант, n	Код	Вариант, n	Код	Вариант, n	Код	Вариант, n	Код
1	1236	9	1456	17	2456	25	2547
2	1246	10	1457	18	1367	26	2537
3	1247	11	2346	19	1467	27	2636
4	1346	12	2347	20	1267	28	2437
5	1347	13	2356	21	2367	29	1236
6	1356	14	2357	22	1247	30	1246
7	1356	15	1246	23	2467	31	1247
8	1237	16	2456	24	2436	32	1346

Таблица 10.2

Длина l , м	Частота f_0 , Гц	Погонная индуктивность L_0 , мкГн/м	Погонная емкость C_0 , пФ/м	Волновое сопротивление R_B , Ом	Нагрузка на входе R_1 , Ом	Нагрузка на выходе R_2 , Ом
1	2	3	4	5	6	7
$0,6/m$	$m \cdot 10^8$	$0,1 (n+m)^{1/3}$	$n^{1/3}$	$100n/(n+m)$	$200n/(n+m)$	$50n/(n+m)$

Задача 2. Найти минимальную длину отрезка линии без потерь с погонными параметрами L_0 и C_0 (табл. 10.2), реализующую на частоте f_0 (табл. 10.2):

- индуктивность $L = (n+m) \cdot 0,225$ мкГн;
- емкость $C = (n+m) \cdot 6,55$ пФ;
- последовательный колебательный контур с резонансной частотой f_0 ;
- параллельный колебательный контур с резонансной частотой f_0 .

Задача 3. В линии без потерь известны погонные параметры $L_0 = 0,1 (n+m)^{1/2}$, мкГн/м, и $C_0 = n^{1/2}$, пФ/м. Определить фазовую скорость волны и сопротивление, которое оказывает линия току бегущей волны. Найти время запаздывания бегущей волны на расстояниях 50, 100, 150 и 200 см от входа линии. Определить в указанных точках линии начальную фазу напряжения, если входное напряжение $u(t) = 10 \cos(2\pi \cdot 10^8 t)$, В.

Задача 4. К линии без потерь длиной $l = n$, км, с погонными параметрами $L_0 = 0,1 (n+m)^{1/2}$, мкГн/м, и $C_0 = n^{1/2}$, пФ/м, подключен источник гармонических колебаний $u(t) = m \cos 2\pi \cdot 10^8 t$, В.

Найти распределение действующих напряжений $U(x)$ вдоль линии для пяти нагрузок R_H : (R_B ; $2 R_B$; $0,5 R_B$; нуль и бесконечность) и построить качественно соответствующие графики.

11. Анализ линейной цепи при негармоническом воздействии

Расчетно-графическая работа № 1

Найти напряжение на выходных зажимах пассивной дифференцирующей или интегрирующей цепи, если напряжение на входных зажимах изменяется во времени по известному закону $u(t)$. Исследуемая цепь и зависимость $u(t)$ выбирается в соответствии с вариантом n и кодом индивидуального задания на расчетную работу (табл. 11.1).

Первая цифра кода указывает номер графика $u(t)$ на рис. 11.1. **Вторая** и **третья** цифры обозначают, соответственно, напряжения U_1 [В] и U_2 [В]. **Четвертая** цифра кода задает отношение длительности импульса t_n к постоянной времени цепи τ . **Пятая** цифра – это код исследуемой цепи из табл. 11.2.

В задании требуется:

1. Построить схему цепи и определить операторный коэффициент передачи цепи по напряжению в режиме холостого хода на выходе.
2. Найти переходную и импульсную характеристики цепи и построить их графики. Рассчитать постоянную времени цепи (τ).
3. Построить зависимость от времени входного напряжения (для случая интегрирующей цепи длительность импульса входного напряжения уменьшить в 10 раз по сравнению с первоначально заданным значением).
4. Найти и построить зависимость от времени выходного напряжения, используя интеграл наложения.
5. Найти спектральную плотность импульса напряжения на входе, используя свойства преобразования Фурье (линейность, спектральная плотность производной, теорема запаздывания).
6. Найти спектральную плотность напряжения на выходе цепи, используя спектральный метод анализа. Построить графики модуля и аргумента спектральной плотности входного и выходного напряжений.

Таблица 11.1

Вариант	Код	Вариант	Код	Вариант	Код	Вариант	Код
1	12491	9	34561	17	78471	25	23571
2	24562	10	21392	18	84562	26	91292
3	62713	11	37213	19	91223	27	64733
4	56324	12	83424	20	57814	28	47224
5	93171	13	45681	21	05661	29	56471
6	31282	14	13492	22	95782	30	72392
7	27833	15	67813	23	46513	31	35613
8	73424	16	72334	24	01224	32	56434

Таблица 11.2

Код	Описание цепи	Параметры элементов цепи
1	Пассивная дифференцирующая CR - цепь	$R = m+n+20, \text{ Ом}; C = 25/(m+n+10), \text{ пФ}$
2	Пассивная дифференцирующая RL - цепь	$R = m+n+20, \text{ Ом}; L = 10(m+n+10), \text{ мкГ}$
3	Пассивная интегрирующая RC - цепь	$R = m+n+30, \text{ Ом}; C = 25/(m+n+10), \text{ пФ}$
4	Пассивная интегрирующая LR - цепь	$R = m+n+30, \text{ Ом}; L = 10(m+n+10), \text{ мкГ}$

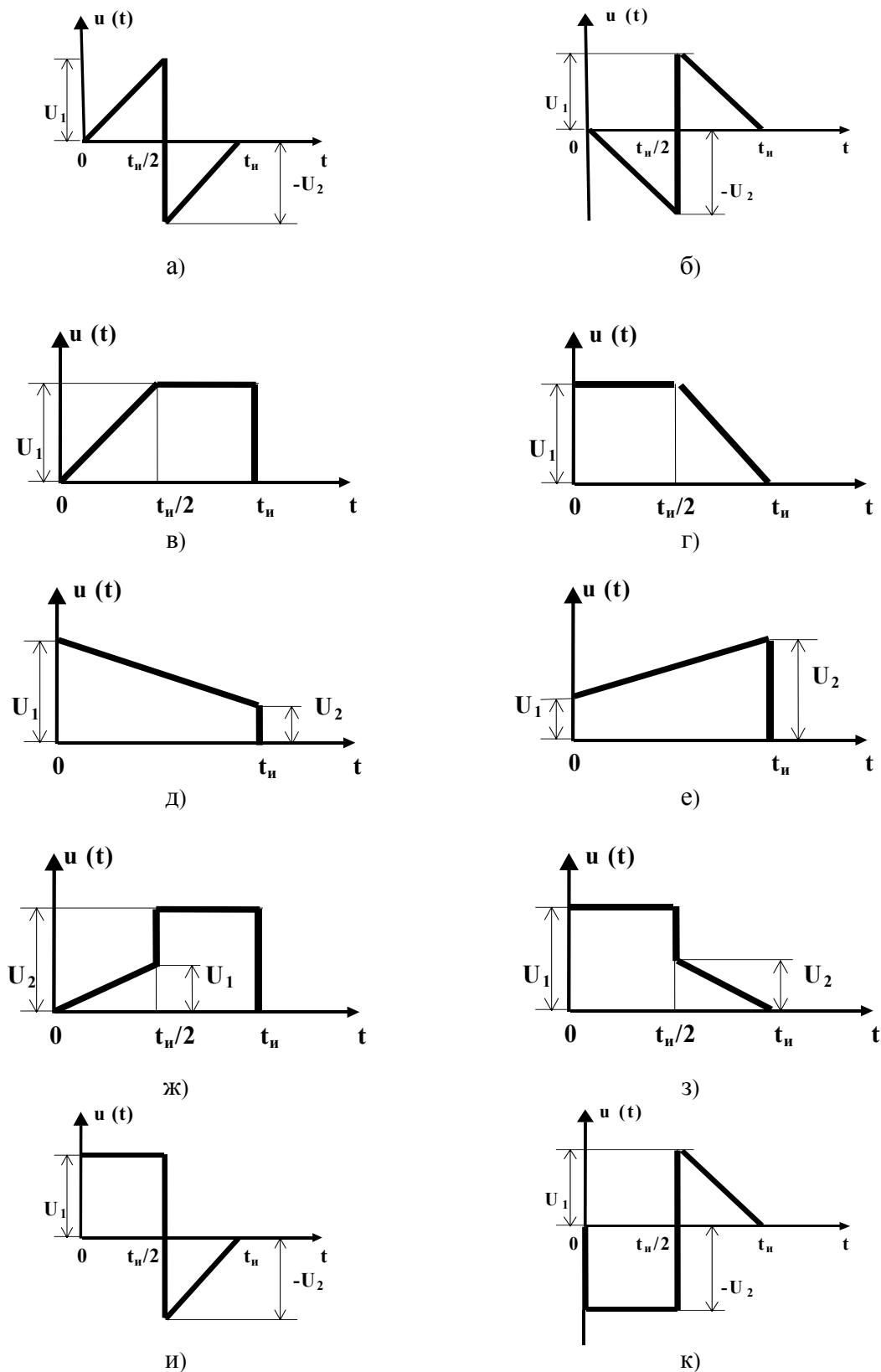


Рис. 11.1. Графики напряжения на входе цепи: а) график № 1; б) график № 2; в) график № 3; г) график № 4; д) график № 5; е) график № 6; ж) график № 7; з) график № 8; и) график № 9; к) график № 10.

12. Анализ активной линейной цепи

Расчетно-графическая работа № 2

Выбор варианта и построение схемы цепи

Общая схема электрической цепи приведена на рис.12.1. Необходимо выбрать в соответствии с вариантом задания на расчетную работу схему исследуемой цепи и значения ее параметров. Конкретная исследуемая схема изображается на основе общей схемы с учетом двузначного кода (табл. 12.1).

Первая цифра кода указывает номер ветви, которая удаляется из схемы, **вторая** цифра - номер ветви с ёмкостью. В остальные ветви включаются сопротивления. Значения параметров элементов цепи вычисляются по формулам

$$R_k = (m+10) \cdot n \cdot k, \quad \text{Ом,}$$

$$C = m + n, \quad \text{мкФ,}$$

где k - номер ветви; m - номер группы на потоке; n - порядковый номер фамилии студента в списке группы.

Коэффициент усиления операционного усилителя (ОУ) является в каждом варианте изменяемым параметром и принимает три значения:

$$\mu_1 = 10; \mu_2 = 100; \mu_3 = 100000.$$

Таблица 12.1

Вариант, n	Код	Вариант, n	Код	Вариант, n	Код
1	21	11	15	21	13
2	31	12	25	22	23
3	41	13	35	23	43
4	51	14	45	24	53
5	61	15	65	25	63
6	14	16	16	26	31
7	24	17	26	27	24
8	34	18	36	28	42
9	54	19	46	29	65
10	64	20	56	30	62

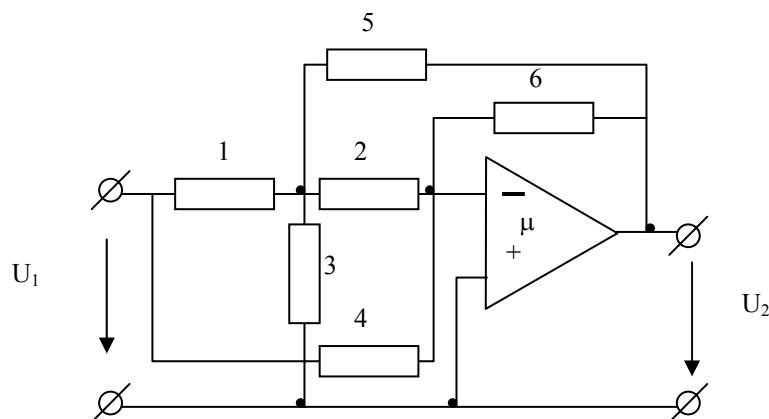


Рис. 12.1. Общая схема цепи

В задании требуется:

1. Найти операторный коэффициент передачи цепи по напряжению и записать его в виде отношения двух полиномов:

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{a_1 p + a_0}.$$

2. Составить таблицу значений коэффициентов полиномов для всех значений μ .
3. Записать комплексную частотную характеристику цепи $K(j\omega)$ и соответствующие ей амплитудно-частотную $K(\omega)$ и фазочастотную $\varphi(\omega)$ характеристики.
4. По найденным аналитическим выражениям рассчитать и построить графики частотных характеристик цепи для трех значений коэффициента усиления ОУ.
5. Найти переходную $h(t)$ и импульсную $g(t)$ характеристики цепи.
6. Рассчитать и построить графики этих характеристик для всех значений изменяемого параметра (μ_1, μ_2, μ_3).
7. Рассчитать соответствующие постоянные времени (τ_1, τ_2, τ_3) цепи. Постоянная времени цепи первого порядка равна модулю обратной величины полюса передаточной функции.

Временные характеристики построить, используя точки

$$k \cdot \Delta t, \quad k = 0, 1, 2 \dots 10, \quad \Delta t = \tau_i / 5.$$

Частотные характеристики построить, используя точки

$$k \cdot \Delta \omega, \quad k = 0, 1, 2 \dots 10, \quad \Delta \omega = \omega_g / 5, \quad \omega_g = 1 / \tau_i.$$

8. Временной метод анализа. Используя найденные временные характеристики цепи и интеграл наложения, найти реакцию цепи на импульс (рис. 12.2). Параметры входного импульсного сигнала:

$$U_{\max} = \frac{m+n}{4} \text{ В}, \quad t_1 = \tau_2, \quad t_2 = 3 \cdot \tau_2, \quad t_3 = 3,5 \cdot \tau_2.$$

9. Рассчитать и построить импульс на выходе цепи для двух значений коэффициента усиления ОУ (μ_1, μ_2). Графики входного и выходных сигналов совместить на одном рисунке или построить синхронно (друг под другом).
10. Увеличить длительность входного импульса в 10 раз. Построить графики входного и выходного сигналов при $\mu = \mu_2$.
11. На основе анализа графиков трёх выходных сигналов сделать вывод о виде цепи (пропорционально - дифференцирующая или пропорционально - интегрирующая). Выделить случай, в котором операция, выполняемая цепью, наиболее близка к идеальному варианту преобразования входного сигнала.
12. Спектральный метод анализа. Найти спектральную плотность выходного сигнала $S(j\omega)$ для случая, наиболее близкого к идеальному (см. п. 9). Рассчитать и построить графики модуля и аргумента спектральной плотности входного и выходного сигналов. Сравнить спектральные характеристики импульсного сигнала на входе и выходе цепи.
13. Сформулировать выводы о влиянии коэффициента усиления ОУ на характеристики цепи, форму выходного сигнала.

Методические указания к расчетно-графической работе № 2

В последние годы многие задачи синтеза электрических цепей с заданными свойствами решаются с использованием интегральных усилителей широкого применения, получивших название операционных усилителей (ОУ). Схемное изображение типового операционного усилителя приведено на рис. 12.3. Усилитель имеет два входа (инвертирующий (-) и неинвертирующий (+)), один выход, содержит то или иное число транзисторов и резисторов и получает питание от источников постоянного напряжения. На схеме усилителя источники питания ОУ обычно не показываются.

Входное сопротивление операционного усилителя весьма велико (на практике десятки и сотни мегаом). Выходное сопротивление достаточно мало (десятки ом). Поэтому приближенно операционный усилитель можно рассматривать как источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН). Современные ОУ имеют коэффициенты усиления $\mu \approx 10^4 \div 10^6$.

Простейшая схема замещения идеального ОУ приведена на рис. 12.4. В неё входит зависимый источник напряжения типа ИНУН, подсоединенный к выходным зажимам усилителя. Его напряжение пропорционально разности напряжений $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$, подведенных к входным зажимам усилителя.

Рассмотрим пример определения операторной передаточной функции цепи с операционным усилителем, основанный на применении метода узловых напряжений.

На первом этапе строится операторная схема замещения цепи при нулевых начальных условиях. Каждый операционный усилитель в исходной схеме заменяется его схемой замещения, в самом простом варианте используется схема, изображенная на рис. 12.3. К входным зажимам цепи подключается независимый источник напряжения $U_1(p)$. Все идеализированные пассивные элементы цепи заменяются их операторными схемами замещения.

Далее используется метод узловых напряжений в операторной форме для составления основной системы уравнений электрического равновесия цепи. В результате решения системы находится операторный коэффициент передачи цепи по напряжению.

В качестве примера рассмотрим цепь, изображенную на рис. 12.5, и найдем операторный коэффициент передачи цепи по напряжению. Перерисуем схему с учетом обозначения ИНУН, и к входу цепи подключим независимый источник напряжения (рис. 12.6). Обозначим узловые напряжения в схеме замещения как U_{10} , U_{20} , U_{30} , U_{40} .

Необходимо обратить внимание на то, что в этой схеме используется неинвертирующий вход ОУ. Поскольку к узлам 1 и 2 подключены источники, равные соответственно U_{10} и U_{20} , то узловые уравнения составляются только для узлов 3 и 4. Последние записываются в канонической форме и имеют вид

$$Y_{31}U_{10} + Y_{32}U_{20} + Y_{33}U_{30} + Y_{34}U_{40} = 0;$$

$$Y_{41}U_{10} + Y_{42}U_{20} + Y_{43}U_{30} + Y_{44}U_{40} = 0,$$

где

$$Y_{31} = -\frac{1}{R_1}, \quad Y_{32} = -pC_1, \quad Y_{33} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + pC_1;$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -\frac{1}{R_2};$$

$$Y_{41} = 0, \quad Y_{42} = 0, \quad Y_{44} = \frac{1}{R_2} + pC_2.$$

Выразим из второго уравнения системы

$$U_{30} = -\frac{Y_{44}U_{40}}{Y_{43}},$$

подставим его в первое и учтем, что

$$U_{40} = U_{20} / \mu.$$

В результате получим первое уравнение в следующем виде:

$$Y_{31}U_{10} + \left(-\frac{Y_{33}Y_{44}}{\mu Y_{34}} + Y_{32} + \frac{Y_{34}}{\mu}\right)U_{20} = 0.$$

Отсюда легко получается операторный коэффициент передачи цепи по напряжению

$$K(p) = \frac{U_{20}(p)}{U_{10}(p)} = \frac{Y_{31}Y_{34}\mu}{Y_{33}Y_{44} - \mu Y_{32}Y_{34} - Y_{34}^2}.$$

Подставим в данную формулу выражения для Y_{ij} и, заменив p на $j\omega$, получим комплексный коэффициент передачи цепи по напряжению:

$$K(j\omega) = \frac{\mu}{-b_2\omega^2 + 1 + j\omega b_1},$$

$$b_1 = C_2(R_1 + R_2) + C_1R_1(1 - \mu), \quad b_2 = C_1C_2R_1R_2.$$

Соответствующие амплитудно-частотная $K(\omega)$ и фазочастотная $\varphi(\omega)$ характеристики выражаются формулами

$$K(\omega) = \frac{\mu}{\sqrt{(1 - b_2\omega^2)^2 + b_1^2\omega^2}},$$

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -\arctg\left[\frac{b_1\omega}{(1 - b_2\omega^2)}\right] & \text{при } \omega^2 < 1/b_2, \\ -\pi - \arctg\left[\frac{b_1\omega}{(1 - b_2\omega^2)}\right] & \text{при } \omega^2 > 1/b_2. \end{cases}$$

Далее по найденным аналитическим выражениям можно рассчитать и построить графики частотных характеристик цепи для нескольких значений коэффициента усиления операционного усилителя μ .

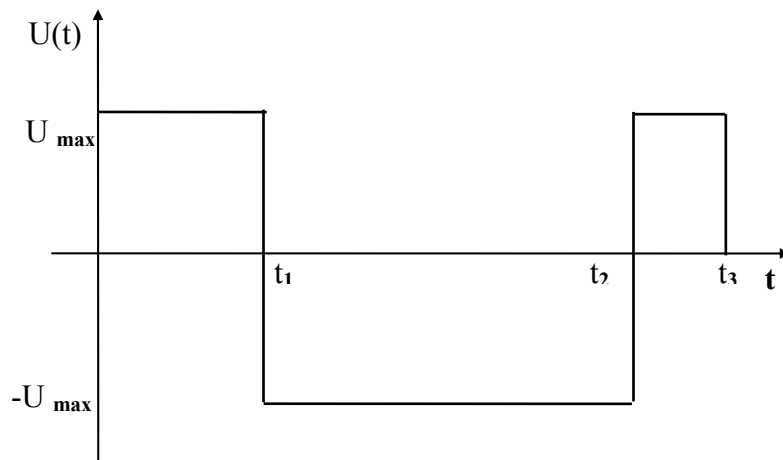


Рис. 12.2. Входной импульс напряжения

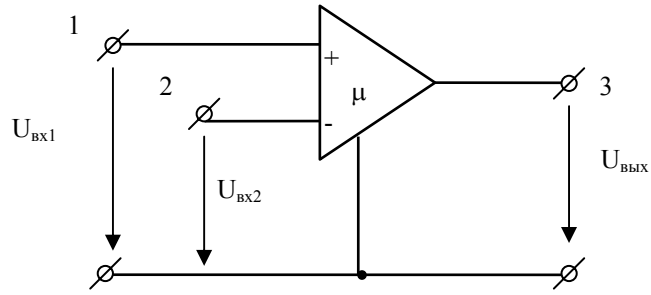


Рис. 12.3. Схема операционного усилителя

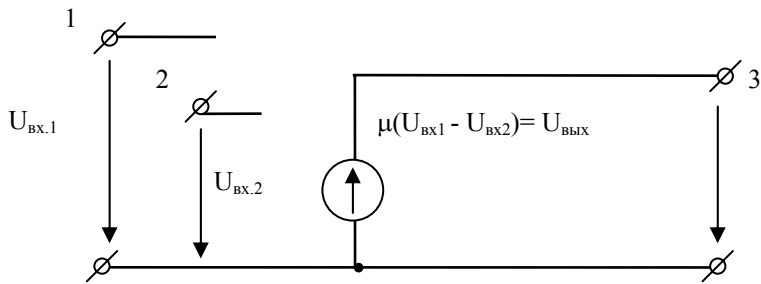


Рис. 12.4. Схема замещения операционного усилителя

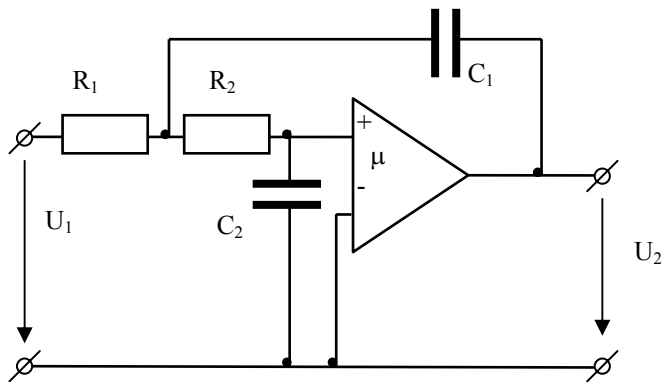


Рис. 12.5. Схема цепи с ОУ

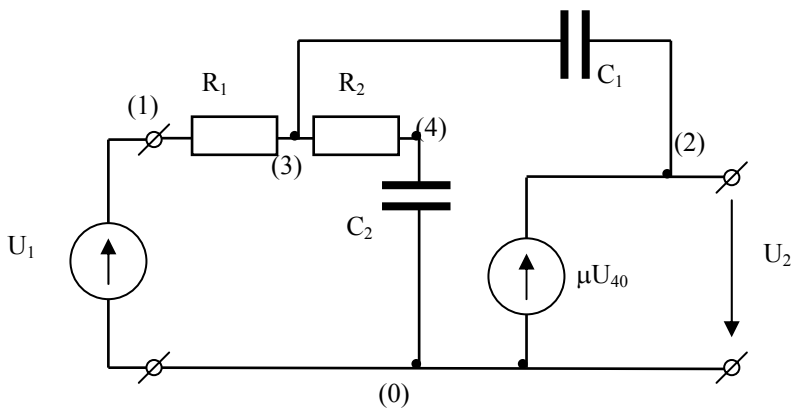


Рис. 12.6. Схема замещения цепи

Литература

Обязательная

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000.
2. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. М.: Радио и связь, 1986.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.
4. Попов В.П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 1998.

Вспомогательная

5. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. М.: Энергия, 1969.
6. Бирюков В.Н., Попов В.П., Семенцов В.И. Сборник задач по теории цепей. М.: Высшая школа, 1998.
7. Воробийенко П.П. Теория линейных электрических цепей: Сборник задач и упражнений. М.: Радио и связь, 1989.
8. Лосев А.К., Зиёмелис Ю.М. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1989.
9. Радиотехнические цепи и сигналы: Примеры и задачи/ Под ред. И.С. Гоноровского. М.: Радио и связь, 1989.
10. Радиотехнические цепи и сигналы: Примеры и задачи/ Под ред. С.И. Баскакова. М.: Высшая школа, 1987.
11. Теория линейных электрических цепей/ Е.П.Афанасьев, О.Е.Гольдин, И.Г. Кляцкин, Г.Я. Пинес. М.: Высшая школа, 1973.
12. Шебес М.Г., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1990.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ ЦЕПИ.....	4
2. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ ПРОСТЕЙШИХ ЦЕПЕЙ	5
3. МЕТОД КОМПЛЕКСНЫХ АМПЛИТУД.....	7
4. МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ И МЕТОД УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ.....	8
5. МЕТОД НАЛОЖЕНИЯ И ТЕОРЕМА ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОМ ИСТОЧНИКЕ	10
6. КОМПЛЕКСНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕПИ	10
7. АНАЛИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА.....	12
8. ПЕРЕХОДНАЯ И ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕПИ.....	13
9. АНАЛИЗ НЕАВТОНОМНОГО ПРОХОДНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА	13
10. АНАЛИЗ ДЛИННОЙ ЛИНИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	15
11. АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПРИ НЕГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	15
12. АНАЛИЗ АКТИВНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ	18
ЛИТЕРАТУРА.....	23

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Составитель Лысенко Тамара Михайловна

Редактор Л. Ю. Козьяйчева

Подписано в печать	10.04.2001	Формат 60*84	1/16
Бумага типографская	Офсетная печать	Усл. печ. л.	1,45
Уч. – изд. л. 1,43	Тираж	Заказ	Цена “С”

Издательство УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, Мира, 19