

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Кафедра Основ радиотехники

**Методические указания к практическим занятиям
по курсу «Основы теории цепей»**

СОДЕРЖАНИЕ

Индивидуальные домашние задания

1. Законы Кирхгофа	3
2. Методы анализа сложных цепей	5
3. Алгебра комплексных чисел	7
4. Метод комплексных амплитуд	8
5. Комплексные сопротивления и проводимости	9
6. Комплексный коэффициент передачи	10
7. Последовательный колебательный контур	12
8. Параллельный колебательный контур	13
9. Системы параметров четырехполюсников	14
10. Расчет цепи с нелинейным двухполюсником	16
11. Свободные процессы в линейных цепях	18
12. Операторный метод анализа цепей	20
13. Стационарные процессы в линии передачи	22
14. Синтез двухполюсников	23
15. Синтез фильтров	24

Справочный материал

Таблица преобразований Лапласа	25
Системы параметров четырехполюсников	26
A-параметры и входное сопротивление отрезка линии	26
Передачные функции фильтров Баттерворта и Чебышева	26

Литература	29
------------	----

Индивидуальные домашние задания

1. Законы Кирхгофа

1.1. Схема цепи изображена на рис. 1. Известны значения ЭДС источников ($E_1 = 10 \text{ В}$, $E_2 = 25 \text{ В}$) и потенциалы внешних зажимов цепи ($\varphi_1 = -5 \text{ В}$, $\varphi_2 = 16 \text{ В}$, $\varphi_3 = 28 \text{ В}$). Номиналы резисторов R_1 , R_2 и R_3 указаны в таблице индивидуальных заданий. Определите потенциал точки A , напряжения на резисторах и токи в ветвях схемы.

Указания. Для составления уравнений цепи по II закону Кирхгофа следует образовать два контура путем введения в схему двух фиктивных ветвей, включенных между внешними зажимами цепи. Напряжения на этих ветвях будут равны разности потенциалов соответствующих узлов. В реальной схеме в качестве таких ветвей, позволяющих установить заданные потенциалы узлов, могут быть использованы идеальные источники напряжения. Сделайте проверку соответствия найденных значений напряжений и токов законам Кирхгофа.

1.2. Схема цепи представлена на рис. 2. Известно, что показания вольтметра равно нулю. Сопротивления резисторов R_1 , R_2 , R_3 и значение тока источника J приведены в таблице индивидуальных заданий. Найдите значение ЭДС источника E .

Указания. Составьте уравнения цепи по I и II законам Кирхгофа соответственно для узла A и контура, содержащего источник ЭДС и резисторы R_2 и R_3 .

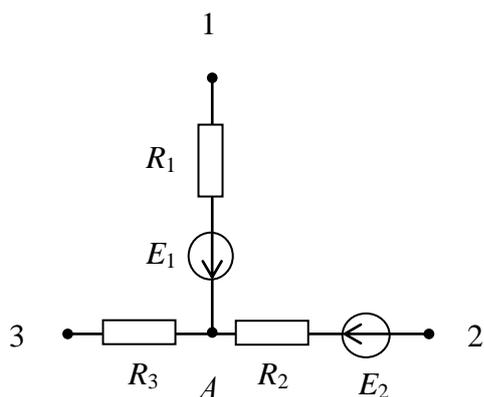


Рис. 1

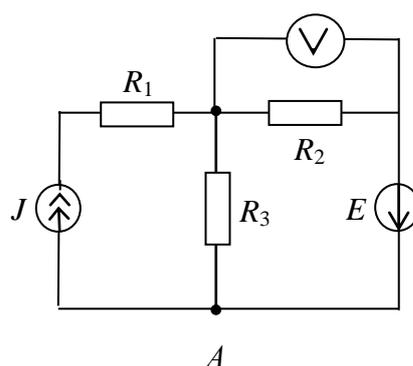


Рис. 2

Таблица индивидуальных заданий

№ по журналу	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	J , мА
1	2	3	4	2
2	13	11	8	5
3	6	8	4	2
4	1	3	4	5
5	7	3	3	1
6	4	1	7	4
7	3	7	4	10
8	7	9	3	8
9	4	6	2	3
10	9	11	4	5
11	3	8	12	10
12	5	7	9	5
13	11	2	14	3
14	4	7	9	3
15	2	2	6	2
16	6	1	3	2
17	8	5	12	3
18	3	2	8	5
19	9	12	5	2
20	12	5	3	2
21	8	6	1	8
22	9	5	10	3
23	5	2	9	10
24	10	5	7	2
25	9	2	6	6
26	3	6	9	3
27	3	7	2	4
28	6	5	1	15
29	8	7	3	4
30	7	1	12	1

2. Методы анализа сложных цепей

2.1. Схема цепи изображена на рис. 3. Номиналы резисторов R_1 - R_6 , а также типы и номиналы источников питания ИП₁-ИП₃ указаны в таблице индивидуальных заданий. Используя предложенный метод анализа (для четных номеров вариантов – метод контурных токов, для нечетных – метод узловых напряжений), найдите токи ветвей и потенциалы узлов относительно базисного.

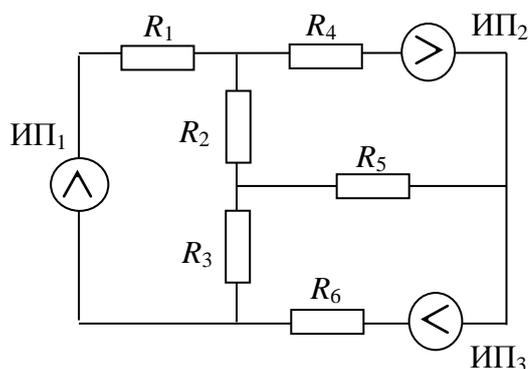


Рис. 3

2.2. Воспользовавшись теоремами Нортон и Тевенина, определите параметры эквивалентных генераторов, которыми можно заменить рассматриваемую цепь относительно зажимов нагрузки. Сопротивлением нагрузки R_n считается один из резисторов цепи R_1 - R_6 , указанный в таблице заданий.

Указания. Для определения параметров эквивалентных генераторов найдите значения напряжения холостого хода U_{xx} и тока короткого замыкания $I_{кз}$ на зажимах нагрузки (при отключенном резисторе R_n), а также входное сопротивление цепи со стороны указанных зажимов при коротком замыкании ветвей, содержащих источники напряжения, и обрыве ветвей, содержащих источники тока. Расчет U_{xx} и $I_{кз}$ проведите соответственно методами узловых напряжений и контурных токов. Проверьте равенство значения тока в резисторе R_n , полученного для исходной схемы, значению тока, которое имеет место в схемах с эквивалентным генератором.

Таблица индивидуальных заданий

№	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	R_6 , кОм	ИП ₁ , В, мА	ИП ₂ , В, мА	ИП ₃ , В, мА	R_H
1	2	3	4	6	1	3	$E = 2$	$E = 8$	$I = 5$	R_1
2	13	11	8	8	5	12	$E = 5$	$I = 3$	$E = 2$	R_2
3	6	8	4	3	2	8	$I = 2$	$E = 10$	$E = 3$	R_4
4	1	3	4	9	12	5	$E = 5$	$E = 2$	$E = 8$	R_6
5	7	3	3	12	5	3	$E = 1$	$I = 6$	$E = 10$	R_3
6	4	1	7	8	6	1	$E = 4$	$E = 3$	$I = 6$	R_5
7	3	7	4	9	5	10	$I = 10$	$E = 4$	$E = 12$	R_3
8	7	9	3	5	2	9	$E = 8$	$I = 15$	$E = 18$	R_2
9	4	6	2	10	5	7	$E = 3$	$E = 4$	$I = 2$	R_5
10	9	11	4	9	2	6	$E = 5$	$I = 1$	$E = 3$	R_4
11	3	8	12	3	6	9	$E = 10$	$E = 4$	$I = 12$	R_1
12	5	7	9	3	7	2	$I = 5$	$E = 2$	$E = 6$	R_2
13	11	2	14	6	5	1	$I = 3$	$E = 8$	$E = 2$	R_2
14	4	7	9	8	7	3	$E = 3$	$I = 7$	$E = 5$	R_3
15	2	2	6	7	1	12	$I = 2$	$E = 6$	$E = 2$	R_5
16	6	1	3	2	3	4	$E = 2$	$E = 5$	$E = 1$	R_4
17	8	5	12	13	11	8	$E = 3$	$E = 2$	$I = 5$	R_5
18	3	2	8	6	8	4	$E = 5$	$I = 2$	$E = 2$	R_6
19	9	12	5	1	3	4	$E = 2$	$E = 6$	$I = 1$	R_3
20	12	5	3	7	3	3	$I = 2$	$E = 8$	$E = 3$	R_2
21	8	6	1	4	1	7	$I = 2$	$E = 4$	$E = 3$	R_4
22	9	5	10	3	7	4	$E = 5$	$E = 2$	$I = 2$	R_2
23	5	2	9	7	9	3	$E = 2$	$E = 8$	$I = 18$	R_4
24	10	5	7	4	6	2	$I = 5$	$E = 7$	$E = 12$	R_3
25	9	2	6	9	11	4	$E = 1$	$I = 6$	$E = 6$	R_2
26	3	6	9	3	8	12	$I = 4$	$E = 5$	$E = 10$	R_4
27	3	7	2	5	7	9	$I = 10$	$E = 2$	$E = 8$	R_6
28	6	5	1	11	2	14	$E = 8$	$E = 2$	$I = 3$	R_3
29	8	7	3	4	7	9	$E = 3$	$I = 6$	$E = 2$	R_6
30	7	1	12	2	2	6	$E = 5$	$E = 8$	$I = 5$	R_2

3. Алгебра комплексных чисел

Два комплексных числа A и B заданы в таблице индивидуальных заданий (в алгебраической форме). Представьте A и B в тригонометрической и экспоненциальной формах записи комплексных чисел. Изобразите A , B векторами на комплексной плоскости. Найдите комплексное число C , являющееся алгебраической комбинацией чисел A и B , заданной в таблице.

Таблица индивидуальных заданий

№ по журналу	A	B	C
1	$-1+j2$	$2-j4$	$(A+B)/A$
2	$2-j3$	$-3-j5$	$(A-B) \cdot A$
3	$-3-j4$	$4+j6$	$(A+B)/B$
4	$4+j5$	$-5+j7$	$(A-B) \cdot B$
5	$-5+j6$	$6-j8$	$(-A+B)/A$
6	$6-j7$	$-7-j9$	$(-A-B) \cdot A$
7	$-7-j8$	$8+j$	$(-A+B)/B$
8	$8+j9$	$-9+j2$	$(-A-B) \cdot B$
9	$-9+j$	$1-j4$	$A/(A+B)$
10	$1-j3$	$-2-j5$	$A \cdot (A-B)$
11	$-2-j4$	$3+j6$	$B/(A+B)$
12	$3+j5$	$-4+j7$	$B \cdot (A-B)$
13	$-4+j6$	$5-j6$	$A/(-A+B)$
14	$5-j7$	$-6-j9$	$A \cdot (-A-B)$
15	$-6-j8$	$7+j$	$B/(-A+B)$
16	$7+j9$	$-8+j2$	$B \cdot (-A-B)$
17	$-8+j$	$9-j3$	$(A-B)/A$
18	$9-j2$	$-1-j5$	$(A+B) \cdot B$
19	$-1-j4$	$2+j6$	$(A-B)/B$
20	$2+j5$	$-3+j7$	$(-A+B) \cdot A$
21	$-3+j6$	$4-j8$	$(-A-B)/A$
22	$4-j7$	$-5-j9$	$(-A+B) \cdot B$
23	$-5-j8$	$6+j$	$(-A-B)/B$
24	$6+j9$	$-7+j2$	$A \cdot (A+B)$
25	$-7+j$	$8-j3$	$A/(A-B)$
26	$8-j2$	$-9-j4$	$B \cdot (A+B)$
27	$-9-j3$	$1+j6$	$B/(A-B)$
28	$1+j5$	$-2+j7$	$A \cdot (-A+B)$
29	$-2+j6$	$3-j8$	$A/(-A-B)$
30	$3-j7$	$-1+j3$	$B \cdot (-A+B)$

4. Метод комплексных амплитуд

4.1. Гармоническое напряжение $u_1(t)$ имеет частоту ω и комплексную амплитуду $\dot{U}_1 = U_{m1} \exp(j\varphi_1)$. Запишите выражение, описывающее функцию $u_1(t)$, и постройте ее график, выбрав в качестве независимой переменной безразмерный параметр ωt . Найдите функции $u_2(t)$ и $u_3(t)$, имеющие комплексные амплитуды $\dot{U}_2 = j\dot{U}_1$ и $\dot{U}_3 = -j\dot{U}_1$. Постройте на комплексной плоскости векторы, соответствующие комплексным амплитудам \dot{U}_1 , \dot{U}_2 и \dot{U}_3 . Параметры ω , U_{m1} и φ_1 приведены в таблице индивидуальных заданий.

Указания. Используйте связь гармонического сигнала с его комплексным представлением, а также формулы перехода от арифметической формы записи комплексных чисел к показательной.

4.2. Участок цепи состоит из двух последовательно включенных источников напряжения одинаковой частоты с комплексными амплитудами $\dot{U}_1 = U_{m1} \exp(j\varphi_1)$ и $\dot{U}_2 = U_{m2} \exp(j\varphi_2)$ (см. таблицу индивидуальных заданий). Рассчитайте комплексную амплитуду напряжения \dot{U}_3 на внешних зажимах этого участка и постройте векторную диаграмму напряжений.

Указания. Используйте свойство линейности операции вычисления комплексной амплитуды суммы гармонических сигналов, имеющих одинаковую частоту, а также связь арифметической и показательной форм записи комплексных чисел. При построении векторной диаграммы покажите выполнение равенства $\dot{U}_3 = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$.

Таблица индивидуальных заданий

№	U_{m1} , В	φ_1 , рад	ω , рад/с	U_{m2} , В	φ_2 , рад	№	U_{m1} , В	φ_1 , рад	ω , рад/с	U_{m2} , В	φ_2 , рад
1	5	1	10^5	3	0	16	3	2	10^5	2	2
2	8	2	10^4	6	1	17	5	1	10^3	3	0
3	2	0	10^6	4	1	18	2	0	10^4	7	3
4	8	1	10^3	3	3	19	4	2	10^6	6	0
5	6	2	10^5	2	0	20	2	1	10^5	1	2
6	3	1	10^4	4	2	21	3	2	10^4	8	1
7	4	0	10^6	6	2	22	2	1	10^6	3	3
8	9	1	10^5	5	1	23	4	0	10^3	8	2
9	5	2	10^3	2	1	24	6	1	10^5	5	2
10	2	1	10^4	7	0	25	5	2	10^4	3	1
11	8	2	10^5	4	1	26	2	1	10^6	4	2
12	2	0	10^6	3	2	27	7	2	10^5	9	1
13	7	1	10^4	5	0	28	4	0	10^3	5	2
14	2	2	10^3	4	3	29	3	1	10^4	2	3
15	4	0	10^6	2	2	30	5	2	10^5	8	0

5. Комплексные сопротивления и проводимости

5.1. Схема цепи, изображенная на рис. 4, возбуждается источником гармонической ЭДС, имеющей частоту ω_0 и комплексную амплитуду $\dot{E} = 100$ В.

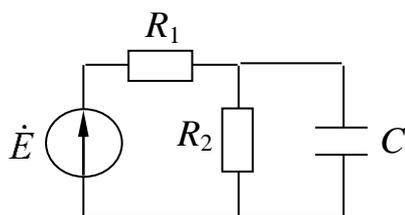


Рис. 4

Найдите выражения, описывающие комплексное сопротивление и комплексную проводимость пассивной части цепи, и рассчитайте их численные значения на заданной частоте. Определите комплексную амплитуду тока \dot{I} в неразветвленной части цепи и комплексные амплитуды напряжений на резисторах. Постройте векторную диаграмму напряжений в цепи, отображающую II закон Кирхгофа.

Номинальные значения емкости конденсатора и сопротивлений резисторов, а также частота ЭДС ω_0 приведены в таблице заданий.

Указания. Для определения комплексного импеданса пассивной части цепи используйте известную зависимость комплексного сопротивления емкостного двухполюсника от частоты, а также формулы для расчета сопротивления двухполюсника, представляющего собой последовательно-параллельное соединение элементарных двухполюсников. Комплексные амплитуды тока \dot{I} и напряжений на резисторах рассчитываются с использованием закона Ома для комплексных амплитуд.

5.2. Рассчитайте комплексные мощности на всех элементах цепи, в том числе и на источнике ЭДС. Покажите выполнение баланса мощностей.

Указания. Для определения комплексных мощностей используйте результаты расчета п. 1.

Таблица индивидуальных заданий

№	C, пФ	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	ω ₀ , рад/с	№	C, пФ	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	ω ₀ , рад/с
1	600	4	5	4·10 ⁵	16	450	4	9	7·10 ⁵
2	800	5	6	3·10 ⁵	17	300	5	4	5·10 ⁵
3	400	10	8	5·10 ⁵	18	950	7.5	5	4·10 ⁵
4	200	7	12	10 ⁵	19	200	3	5	9·10 ⁵
5	700	4	6	3·10 ⁵	20	600	5	8	4·10 ⁵
6	500	6	3	6·10 ⁵	21	800	7	6	2·10 ⁵
7	300	2	5	8·10 ⁵	22	400	4	3	5·10 ⁵
8	200	7	9	5·10 ⁵	23	200	6	5	4·10 ⁵
9	600	3	1.7	3·10 ⁵	24	700	2	9	3·10 ⁵
10	550	5	3.5	5·10 ⁵	25	500	7	1.7	7·10 ⁵
11	350	4.5	7	7·10 ⁵	26	300	3	3.5	5·10 ⁵
12	750	3	5	3·10 ⁵	27	200	5	7	3·10 ⁵
13	250	6	8	4·10 ⁵	28	600	4.5	5	5·10 ⁵
14	800	2	3	5·10 ⁵	29	550	3	8	8·10 ⁵
15	900	2.5	5	2·10 ⁵	30	350	6	3	6·10 ⁵

6. Комплексный коэффициент передачи

Схемы цепей изображены на рис. 5, варианты схем и выходных сигналов приведены в таблице индивидуальных заданий. Найдите выражение, описывающее комплексный коэффициент передачи $K(j\omega)$. Проанализируйте полученное выражение: для этого найдите модуль $|K(j\omega)|$ (амплитудно-частотную характеристику цепи) и аргумент $\varphi_K(\omega)$ (фазо-частотную характеристику). Определите максимальное значение АЧХ K_{max} , частоту среза ω_c и значение ФЧХ на частоте среза $\varphi_K(\omega_c)$. Постройте, качественно, полученные зависимости АЧХ и ФЧХ. На графиках укажите K_{max} , ω_c и $\varphi_K(\omega_c)$.

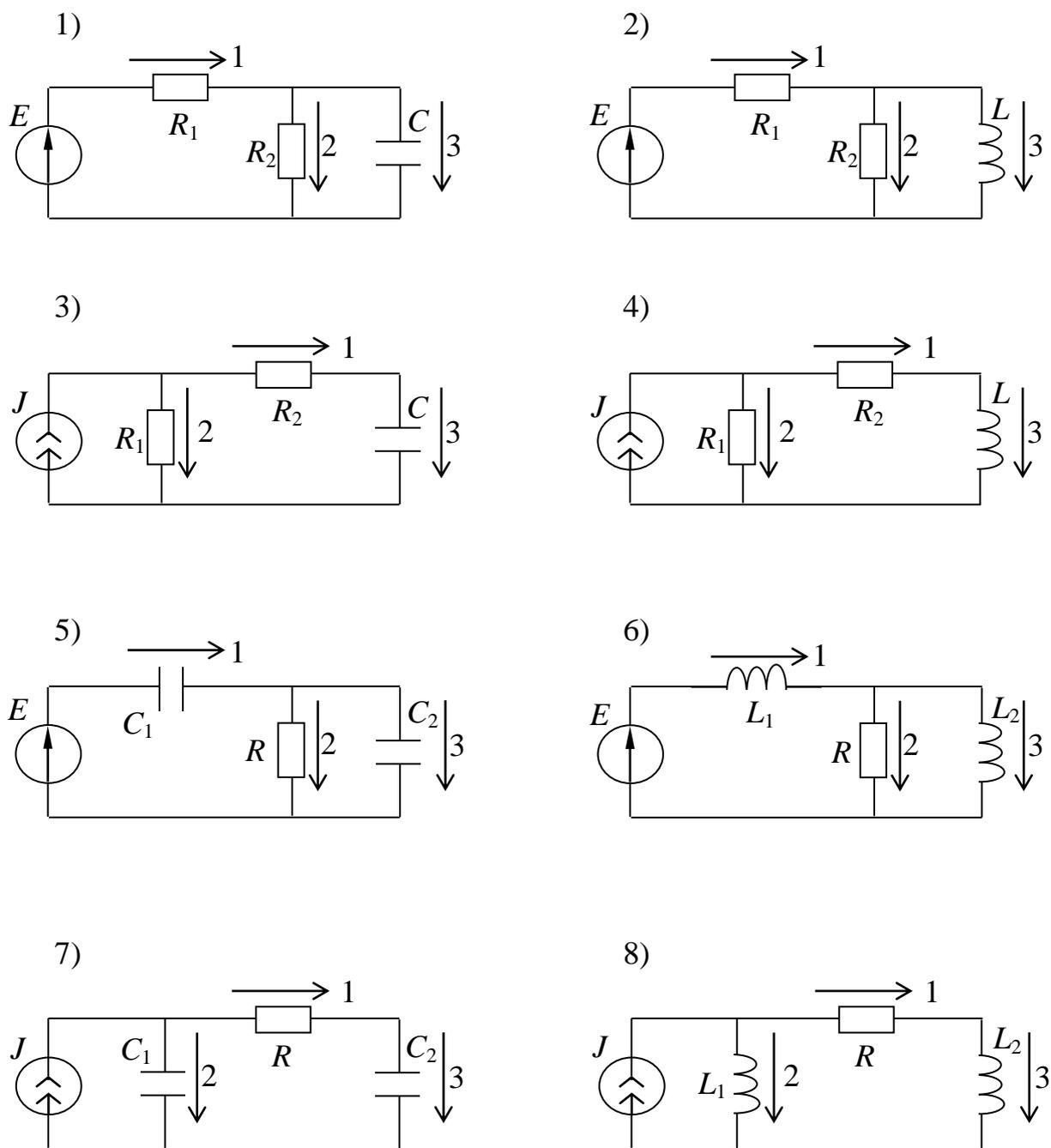


Рис. 5

Таблица индивидуальных заданий

№ по журналу	№ схемы	№ выхода	Сигнал
1	1	1	<i>U</i>
2	2	1	<i>U</i>
3	3	1	<i>U</i>
4	4	1	<i>U</i>
5	5	1	<i>U</i>
6	6	1	<i>U</i>
7	7	1	<i>U</i>
8	8	1	<i>U</i>
9	1	2	<i>I</i>
10	2	2	<i>I</i>
11	3	2	<i>I</i>
12	4	2	<i>I</i>
13	5	2	<i>I</i>
14	6	2	<i>I</i>
15	7	2	<i>I</i>
16	8	2	<i>I</i>
17	1	3	<i>U</i>
18	2	3	<i>U</i>
19	3	3	<i>U</i>
20	4	3	<i>U</i>
21	5	3	<i>U</i>
22	6	3	<i>U</i>
23	7	3	<i>U</i>
24	8	3	<i>U</i>
25	1	3	<i>I</i>
26	2	3	<i>I</i>
27	3	3	<i>I</i>
28	4	3	<i>I</i>
29	5	3	<i>I</i>
30	6	3	<i>I</i>

7. Последовательный колебательный контур

7.1. Контур образован последовательным подключением к источнику гармонической ЭДС индуктивного L , емкостного C и резистивного r элементов. Номинальные значения параметров L , C , r элементов приведены в таблице индивидуальных заданий. Рассчитайте резонансную частоту f_0 , характеристическое сопротивление ρ , добротность Q и полосу пропускания $2\Delta f$ контура. Найдите фазовые сдвиги между током и напряжением на каждом из элементов данной цепи, включая источник ЭДС, на частотах f_0 , $0.98f_0$ и $1.02f_0$.

Указания. Для расчета обобщенных параметров контура используйте известные соотношения, связывающие их с физическими параметрами. Фазовые сдвиги между током и напряжением на элементах цепи равны аргументу комплексного сопротивления каждого из этих элементов на заданной частоте.

7.2. Контур, рассмотренный в п. 1, возбуждается источником гармонической ЭДС, частота которой совпадает с резонансной частотой контура. Определите емкость конденсатора $C_{\text{доп}}$, подключение которого параллельно конденсатору C приводит к снижению напряжения на индуктивном элементе вдвое по сравнению с резонансным значением напряжения.

Указания. Используйте связь напряжения на реактивном элементе последовательного контура с резонансным значением напряжения через обобщенную расстройку. Значение $C_{\text{доп}}$ определяется, исходя из смещения резонансной частоты контура, требуемого для получения необходимой обобщенной расстройки.

Таблица индивидуальных заданий

№	C , пФ	L , мкГн	r , Ом	№	C , пФ	L , мкГн	r , Ом
1	600	700	12	16	450	550	12
2	800	650	15	17	300	450	14
3	400	500	10	18	950	750	10
4	200	300	18	19	200	250	15
5	700	550	8	20	600	650	13
6	500	750	10	21	800	700	10
7	300	400	12	22	400	650	12
8	200	350	13	23	200	500	13
9	600	800	14	24	700	300	14
10	550	450	9	25	500	550	9
11	350	250	7	26	300	750	7
12	750	600	8	27	200	400	8
13	250	300	11	28	600	350	11
14	800	700	6	29	550	800	6
15	900	850	9	30	350	450	9

8. Параллельный колебательный контур

8.1. Схема параллельного контура изображена на рис. 6. Номинальные значения параметров L , C , r приведены в таблице индивидуальных заданий. Найдите резонансную частоту f_0 , резонансное сопротивление R_p , добротность Q

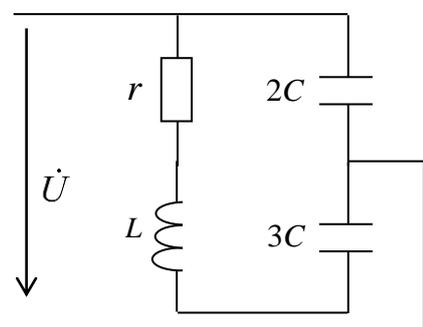


Рис. 6

и полосу пропускания $2\Delta f$ контура. Определите фазовые сдвиги между напряжением на контуре и током в неразветвленной части цепи на частотах f_0 , $0.99f_0$ и $1.01f_0$.

Указания. Для расчета обобщенных параметров контура используйте известные соотношения, связывающие их с физическими параметрами. Фазовые сдвиги между напряжением на контуре и током в неразветвленной части цепи равны аргументу комплексного сопротивления контура на заданной частоте.

8.2. Считая, что схема, рассмотренная в п. 1, запитывается от идеального источника гармонического тока с комплексной амплитудой $\dot{J} = 1$ мА, получите выражения для расчета комплексных амплитуд токов в ветвях контура. Рассчитайте и постройте векторные диаграммы токов, отображающие I закон Кирхгофа, для частот внешнего воздействия равных f_0 , $0.99f_0$ и $1.01f_0$.

Указания. Используйте приближенные соотношения для расчета комплексного сопротивления контура с учетом обобщенной расстройки. При расчете токов в ветвях контура по закону Ома для комплексных амплитуд пренебрегите отклонением частоты гармонического напряжения на контуре от резонансной.

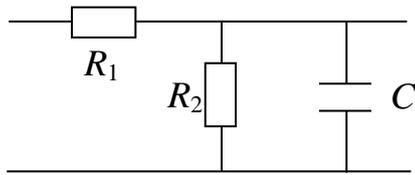
Таблица индивидуальных заданий

№	C , пФ	L , мкГн	r , Ом	№	C , пФ	L , мкГн	r , Ом
1	600	700	12	16	450	550	12
2	800	650	15	17	300	450	14
3	400	500	10	18	950	750	10
4	200	300	18	19	200	250	15
5	700	550	8	20	600	650	13
6	500	750	10	21	800	700	10
7	300	400	12	22	400	650	12
8	200	350	13	23	200	500	13
9	600	800	14	24	700	300	14
10	550	450	9	25	500	550	9
11	350	250	7	26	300	750	7
12	750	600	8	27	200	400	8
13	250	300	11	28	600	350	11
14	800	700	6	29	550	800	6
15	900	850	9	30	350	450	9

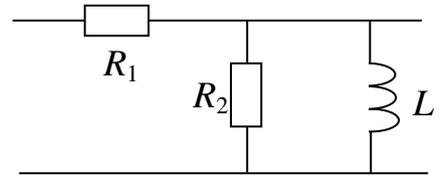
9. Системы параметров четырехполюсников

Схемы четырехполюсников представлены на рис. 7, варианты схем и тип параметров приведены в таблице индивидуальных заданий. Найдите выражения, описывающие заданные параметры четырехполюсника. Дайте физическую интерпретацию найденных параметров.

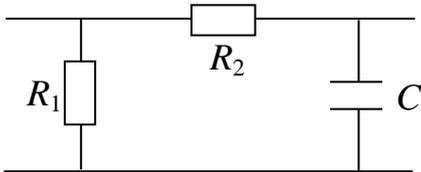
1)



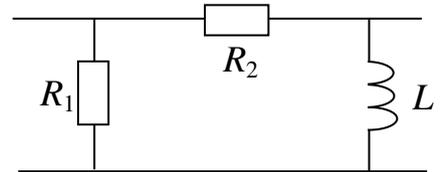
2)



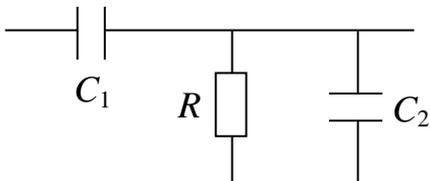
3)



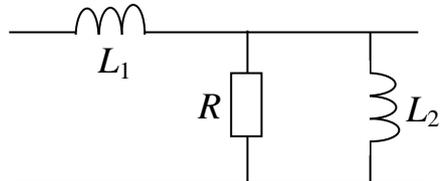
4)



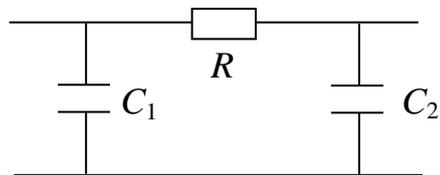
5)



6)



7)



8)

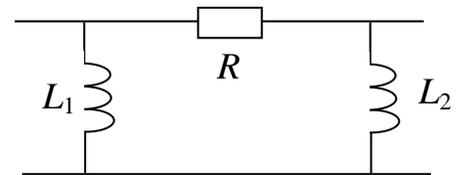


Рис. 7

Таблица индивидуальных заданий

№ по журналу	№ схемы	Система параметров
1	1	Y
2	2	Z
3	3	A
4	4	H
5	5	Y
6	6	Z
7	7	A
8	8	H
9	1	Z
10	2	A
11	3	H
12	4	Y
13	5	Z
14	6	A
15	7	H
16	8	Y
17	1	A
18	2	H
19	3	Y
20	4	Z
21	5	A
22	6	H
23	7	Y
24	8	Z
25	1	H
26	2	Y
27	3	Z
28	4	A
29	5	H
30	6	Y

10. Расчет цепи с нелинейным двухполюсником

Цепь с нелинейным двухполюсником представлена на рис. 8.

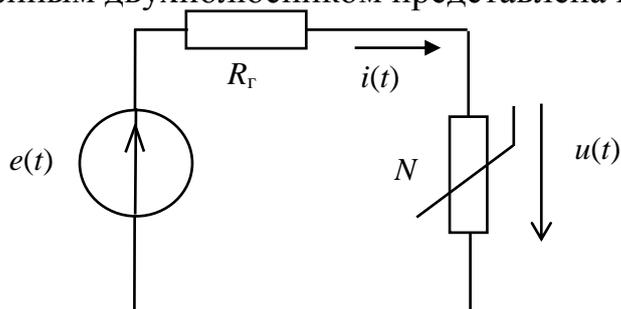


Рис. 8

На входе цепи действует гармоническое напряжение вида $e(t) = E_0 + E_m \cos(\omega_0 t)$. Параметры напряжения E_0 , E_m и ω_0 , сопротивление резистора R_r , и вид нелинейного двухполюсника N заданы в таблице индивидуальных заданий.

10.1. Постройте ВАХ нелинейного двухполюсника, нагрузочную прямую, определите рабочую точку двумя способами: аналитически и графически. Определите крутизну ВАХ нелинейного элемента S в рабочей точке, рассчитайте дифференциальное сопротивление нелинейного элемента. Определите напряжение $u(t)$ и ток $i(t)$ на нелинейном двухполюснике, постройте их осциллограммы.

Указания. Для определения напряжения и тока воспользуйтесь линейной схемой замещения нелинейного двухполюсника в режиме малых сигналов.

10.2. Рассчитайте амплитуды и частоты гармоник тока через нелинейный двухполюсник, используя ВАХ. Обоснуйте целесообразность перехода к линейной схеме замещения нелинейного двухполюсника.

Варианты нелинейных двухполюсников¹:

	Вариант 1	Вариант 2
Схема N		
ВАХ N	$I(U) = \begin{cases} (U - 0.2)^2, & U \geq 0.2 \text{ В} \\ 0, & U < 0.2 \text{ В} \end{cases} \text{ [мА]},$	$I(U) = 0.6U^3 \text{ [мА]}.$

¹ Резистор R входит в состав нелинейных двухполюсников N . Значение сопротивления R учтено в ВАХ.

Таблица индивидуальных заданий

№ по журналу	E_0 , В	E_m , В	ω_0 , рад/с	R_r , кОм	Вариант N
1	1,9	0,10	$7 \cdot 10^5$	0,5	2
2	2,1	0,20	$5 \cdot 10^5$	0,8	1
3	-2,3	0,15	$4 \cdot 10^5$	0,7	2
4	2,0	0,17	$9 \cdot 10^5$	0,1	1
5	2,4	0,13	$4 \cdot 10^5$	0,6	2
6	1,7	0,19	$2 \cdot 10^5$	0,3	1
7	-1,6	0,14	$5 \cdot 10^5$	0,4	2
8	2,5	0,11	$4 \cdot 10^5$	1,0	1
9	2,2	0,18	$3 \cdot 10^5$	0,9	2
10	1,9	0,16	$7 \cdot 10^5$	0,2	1
11	-2,1	0,12	$5 \cdot 10^5$	1,1	2
12	2,3	0,10	$3 \cdot 10^5$	0,4	1
13	2,0	0,20	$5 \cdot 10^5$	0,5	2
14	2,4	0,15	$8 \cdot 10^5$	0,8	1
15	-1,7	0,17	$6 \cdot 10^5$	0,7	2
16	1,6	0,13	$4 \cdot 10^5$	0,1	1
17	2,5	0,19	$3 \cdot 10^5$	0,6	2
18	2,2	0,14	$5 \cdot 10^5$	0,3	1
19	-1,9	0,11	10^5	0,4	2
20	2,1	0,18	$3 \cdot 10^5$	1,0	1
21	2,3	0,16	$6 \cdot 10^5$	0,9	2
22	2,0	0,12	$8 \cdot 10^5$	0,2	1
23	-2,4	0,20	$5 \cdot 10^5$	1,1	2
24	1,7	0,15	$3 \cdot 10^5$	0,4	1
25	1,6	0,17	$5 \cdot 10^5$	0,5	2
26	2,5	0,13	$7 \cdot 10^5$	0,8	1
27	-2,2	0,19	$3 \cdot 10^5$	0,7	2
28	2,1	0,14	$4 \cdot 10^5$	0,1	1
29	2,3	0,11	$5 \cdot 10^5$	0,6	2
30	2,0	0,18	$2 \cdot 10^5$	0,3	1

11. Свободные процессы в линейных электрических цепях

11.1. Схемы цепей первого порядка изображены на рис. 9, варианты схем и выходных сигналов приведены в таблице индивидуальных заданий. На входе цепи действует постоянный источник ЭДС или тока. В нулевой момент времени источник энергии отключается (источник ЭДС закорачивается, источник тока обрывается).

Составьте дифференциальное уравнение, описывающее собственные колебания в цепи, относительно заданного выходного сигнала. Определите начальное условие и решите дифференциальное уравнение в общем виде. Постройте, качественно, график полученной временной зависимости выходного сигнала. Отметьте на графике постоянную времени цепи и время установления.

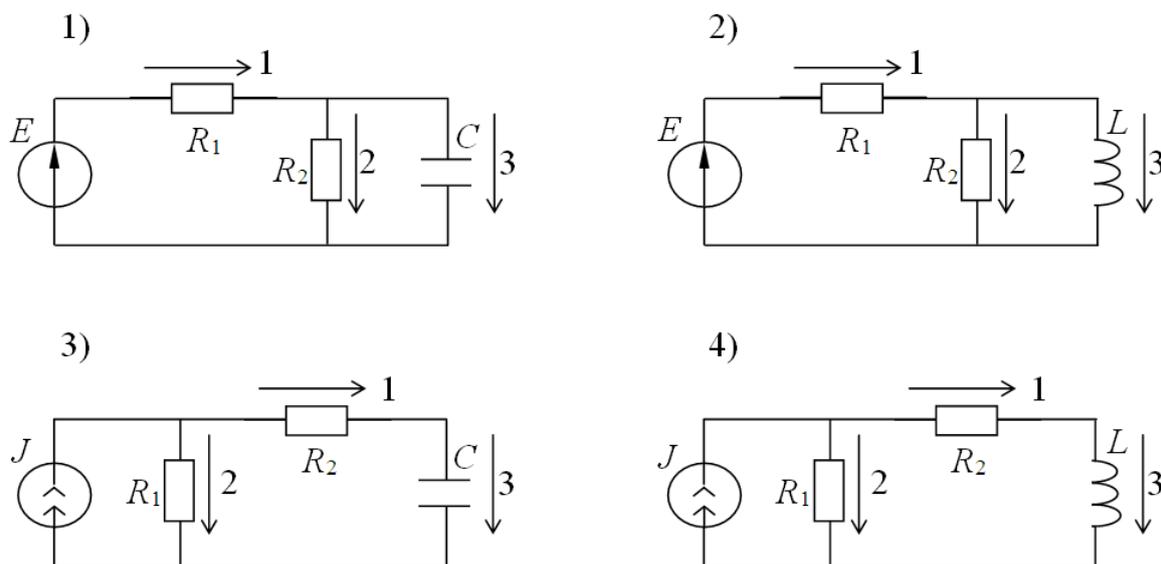


Рис. 9

11.2. Дан колебательный контур с добротностью $Q \gg 1$, один из реактивных элементов которого имеет начальный запас энергии. Варианты схем колебательного контура:

1 – параллельное соединение R , L и C элементов;

2 – последовательное соединение R , L и C элементов.

Варианты схем, элементов, являющихся выходом цепи, выходных сигналов и начальных условий представлены в таблице индивидуальных заданий.

Составьте дифференциальное уравнение, описывающее собственные колебания в контуре, относительно заданного выходного сигнала. Определите недостающие начальные условия и решите дифференциальное уравнение в общем виде. Постройте, качественно, график полученной временной зависимости выходного сигнала. Отметьте на графике постоянную времени цепи и время установления.

Таблица индивидуальных заданий

№ по журналу	К задаче 1			К задаче 2			
	№ схемы	№ выхода	Сигнал	№ схемы	Выход	Сигнал	Нач. усл.
1	1	1	U	1	R	I	$u_C(0) = U_0$
2	2	1	U	2	L	I	$u_C(0) = U_0$
3	3	1	U	1	C	I	$u_C(0) = U_0$
4	4	1	U	2	R	I	$i_L(0) = I_0$
5	1	2	U	1	L	I	$i_L(0) = I_0$
6	2	2	U	2	C	I	$i_L(0) = I_0$
7	3	2	U	1	R	I	$i_L(0) = I_0$
8	4	2	U	2	L	I	$u_C(0) = U_0$
9	1	3	U	1	C	I	$u_C(0) = U_0$
10	2	3	U	2	R	I	$u_C(0) = U_0$
11	3	3	U	1	L	I	$u_C(0) = U_0$
12	4	3	U	2	C	I	$i_L(0) = I_0$
13	1	1	I	1	R	U	$i_L(0) = I_0$
14	2	1	I	2	L	U	$i_L(0) = I_0$
15	3	1	I	1	C	U	$i_L(0) = I_0$
16	4	1	I	2	R	U	$u_C(0) = U_0$
17	1	2	I	1	L	U	$u_C(0) = U_0$
18	2	2	I	2	C	U	$u_C(0) = U_0$
19	3	2	I	1	R	U	$u_C(0) = U_0$
20	4	2	I	2	L	U	$i_L(0) = I_0$
21	1	3	I	1	C	U	$i_L(0) = I_0$
22	2	3	I	2	R	U	$i_L(0) = I_0$
23	3	3	I	1	L	U	$i_L(0) = I_0$
24	4	3	I	2	C	U	$u_C(0) = U_0$
25	1	2	U	1	R	I	$u_C(0) = U_0$
26	2	1	U	2	L	I	$u_C(0) = U_0$
27	3	3	I	1	C	U	$i_L(0) = I_0$
28	4	1	I	2	R	U	$i_L(0) = I_0$

12. Операторный метод анализа цепей

Схемы цепей изображены на рис. 10. На вход цепи действует импульс ЭДС (или тока) прямоугольной формы. Определите операторный коэффициент передачи цепи для заданного выходного отклика. Найдите выражение, описывающее сигнал на выходе цепи, и постройте его примерную осциллограмму, считая, что длительность импульса равна постоянной времени цепи. Номер схемы, номер выхода и вид выходного отклика цепи (ток или напряжение) заданы в таблице индивидуальных заданий.

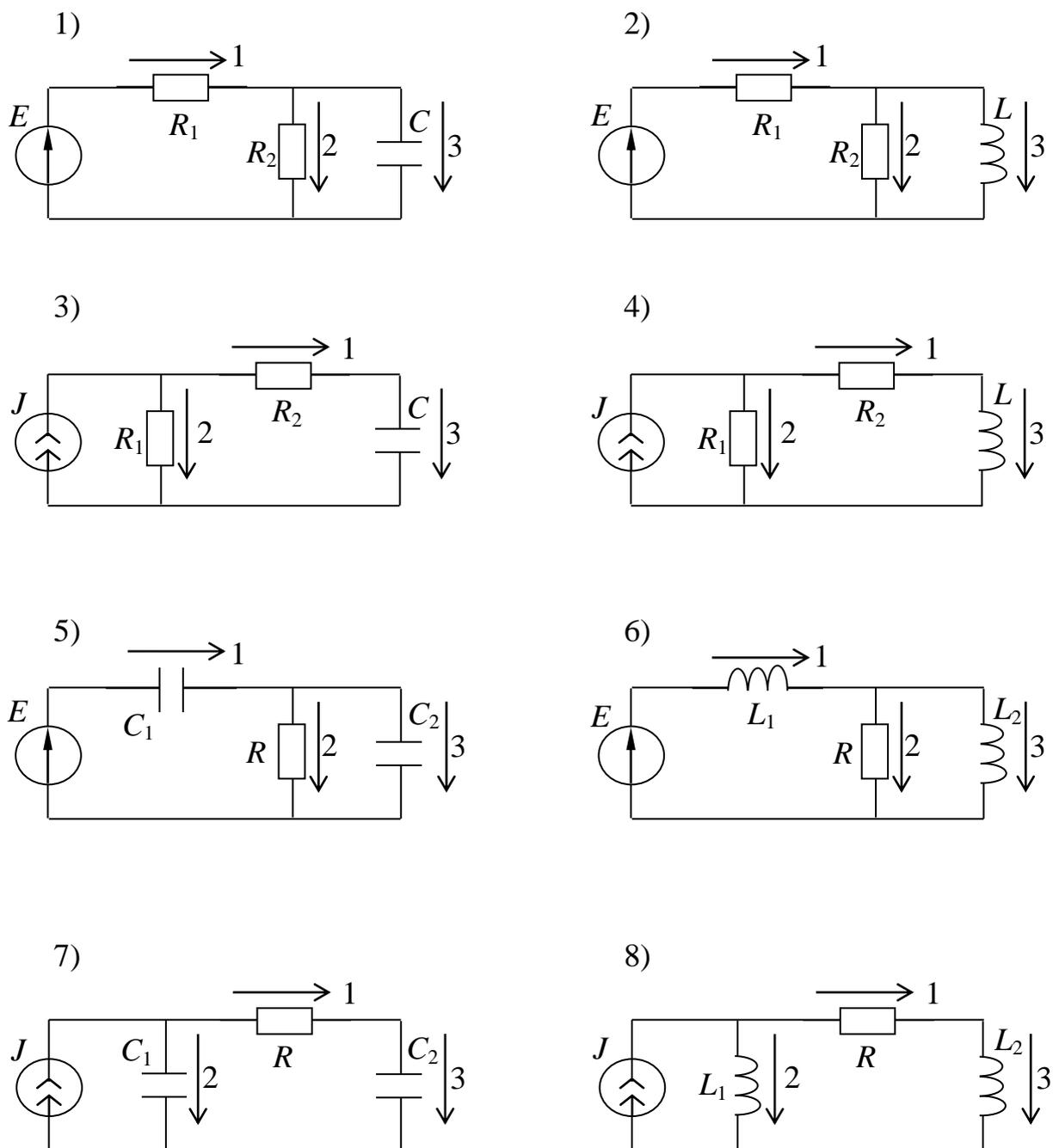


Рис. 10

Таблица индивидуальных заданий

№ по журналу	№ схемы	№ выхода	Выходной отклик цепи
1	1	3	<i>I</i>
2	2	3	<i>I</i>
3	3	3	<i>I</i>
4	4	3	<i>I</i>
5	5	3	<i>I</i>
6	6	3	<i>I</i>
7	7	3	<i>I</i>
8	8	3	<i>I</i>
9	1	1	<i>U</i>
10	2	1	<i>U</i>
11	3	1	<i>U</i>
12	4	1	<i>U</i>
13	5	1	<i>U</i>
14	6	1	<i>U</i>
15	7	1	<i>U</i>
16	8	1	<i>U</i>
17	1	2	<i>I</i>
18	2	2	<i>I</i>
19	3	2	<i>I</i>
20	4	2	<i>I</i>
21	5	2	<i>I</i>
22	6	2	<i>I</i>
23	7	2	<i>I</i>
24	8	2	<i>I</i>
25	1	3	<i>U</i>
26	2	3	<i>U</i>
27	3	2	<i>U</i>
28	4	2	<i>U</i>

13. Стационарные процессы в линии передачи

Двухпроводная линия без потерь с волновым сопротивлением Z_B и длиной $L_{\text{лин}}$ нагружена на сопротивление Z_H и подключена к источнику ЭДС с частотой f , амплитудой U_G и внутренним сопротивлением $Z_G = Z_B$. На расстоянии L_P от нагрузки в разрыв одного из проводов линии включено сопротивление Z_P . Параметры приведены в таблице индивидуальных заданий.

Рассчитайте КСВ на участке линии от генератора до сопротивления Z_P .

Найдите входное сопротивление линии в месте подключения генератора.

Постройте графики распределений амплитуд напряжения и тока на участке линии от генератора до сопротивления Z_P .

Таблица индивидуальных заданий

№	$Z_B, \text{Ом}$	$Z_P, \text{Ом}$	$Z_H, \text{Ом}$	$U_G, \text{В}$	$f, \text{МГц}$	$L_{\text{лин}}, \text{см}$	$L_P, \text{см}$
1	50	j110	25+j35	1	300	125	55
2	60	-j120	30-j40	2	280	135	60
3	70	j130	140+j210	3	220	170	80
4	80	-j150	120-j200	4	180	200	95
5	90	j180	45+j135	5	150	250	120
6	100	-j220	50-j150	6	140	270	130
7	120	j240	300+j40	7	130	290	145
8	150	-j260	225-j45	8	125	300	155
9	180	j280	72+j108	9	120	310	160
10	50	-j300	120-j80	10	110	340	165
11	60	j310	600+j540	1	100	375	190
12	70	-j320	625-j750	2	95	395	200
13	80	j350	70+j560	3	90	415	205
14	90	-j50	60-j750	4	85	440	215
15	100	j60	30+j40	5	80	470	235
16	120	-j70	25-j30	6	75	500	245
17	150	j80	140-j210	7	70	530	260
18	180	-j90	120+j200	8	65	575	290
19	50	j100	45-j135	9	60	620	310
20	60	-j110	50+j150	10	55	680	335
21	70	j120	300-j40	1	50	750	370
22	80	-j130	225+j45	2	48	780	390
23	90	j140	72-j108	3	46	810	400
24	100	-j150	120+j80	4	44	850	430
25	120	j180	600-j540	5	42	890	490
26	150	-j200	625+j75	6	40	930	460
27	180	j220	56-j84	7	38	980	495

14. Синтез двухполюсников

Задана функция сопротивления $Z(p)$, значения коэффициентов полиномов которой приведены в таблице индивидуальных заданий:

$$Z(p) = \frac{a_4 p^4 + a_2 p^2 + 1}{b_3 p^3 + b_1 p}.$$

Проведите синтез двух схем заданного реактивного двухполюсника методом Кауэра. Для этого представьте функцию $Z(p)$ в виде цепной дроби путем деления полиномов, начиная, в одном случае, со старших, а в другом – с младших степеней полинома делимого.

Таблица индивидуальных заданий

№ по журналу	$a_4, \text{ Ом} \times \text{с}^4$	$a_2, \text{ Ом} \times \text{с}^2$	$b_3, \text{ с}^3$	$b_1, \text{ с}$
1	5e-028	2.5e-013	6e-024	1.6e-009
2	8e-028	3e-013	1.1e-023	1.7e-009
3	1.1e-027	3.5e-013	1.6e-023	1.8e-009
4	1.4e-027	4e-013	2.1e-023	1.9e-009
5	1.7e-027	4.5e-013	2.6e-023	2e-009
6	2e-027	5e-013	3.1e-023	2.1e-009
7	2.3e-027	5.5e-013	3.6e-023	2.2e-009
8	2.6e-027	6e-013	4.1e-023	2.3e-009
9	2.9e-027	6.5e-013	4.6e-023	2.4e-009
10	3.2e-027	7e-013	5.1e-023	2.5e-009
11	3.5e-027	7.5e-013	5.6e-023	2.6e-009
12	3.8e-027	8e-013	6.1e-023	2.7e-009
13	4.1e-027	8.5e-013	6.6e-023	2.8e-009
14	4.4e-027	9e-013	7.1e-023	2.9e-009
15	4.7e-027	9.5e-013	7.6e-023	3e-009
16	5e-027	1e-012	8.1e-023	3.1e-009
17	5.3e-027	1.05e-012	8.6e-023	3.2e-009
18	5.6e-027	1.1e-012	9.1e-023	3.3e-009
19	5.9e-027	1.15e-012	9.6e-023	3.4e-009
20	6.2e-027	1.2e-012	1.01e-022	3.5e-009
21	6.5e-027	1.25e-012	1.06e-022	3.6e-009
22	6.8e-027	1.3e-012	1.11e-022	3.7e-009
23	5e-028	1.35e-012	1.16e-022	3.8e-009
24	8e-028	1.4e-012	1.21e-022	3.9e-009
25	1.1e-027	1.45e-012	1.26e-022	4e-009
26	2.6e-027	6e-013	4.1e-023	2.3e-009
27	2.9e-027	6.5e-013	4.6e-023	2.4e-009

15. Синтез фильтров

Проведите синтез линейного фильтра с заданной аппроксимацией АЧХ. Получите выражение для передаточной функции фильтра и проведите его схемную реализацию в виде каскадного соединения звеньев первого и/или второго порядков (с включением между ними развязывающих каскадов с $K_U = 1$, $R_{вх} = \infty$, $R_{вых} = 0$) и расчет параметров элементов схемы. Постройте в масштабе график зависимости коэффициента передачи по мощности синтезированного фильтра от частоты. Исходные данные для синтеза приведены в таблице индивидуальных заданий.

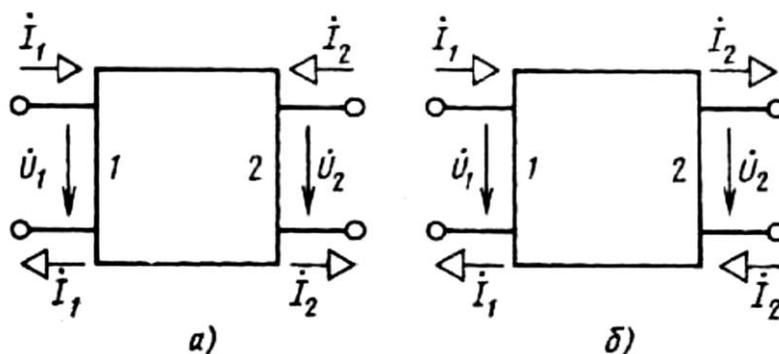
Таблица индивидуальных заданий

№ по журналу	Вид аппроксимации	Частота среза, кГц	Тип фильтра	Верхняя (нижняя) частота, кГц	Ослабление на верхней (нижней) частоте, дБ	Неравномерность в полосе пропускания, дБ
1	Баттерворта	60	ФВЧ	30	20	-
2	Чебышева	90	ФНЧ	180	15	1
3	Баттерворта	100	ФНЧ	260	28	-
4	Чебышева	150	ФВЧ	50	20	2
5	Баттерворта	110	ФВЧ	60	20	-
6	Чебышева	50	ФНЧ	130	25	3
7	Баттерворта	80	ФНЧ	150	20	-
8	Чебышева	190	ФВЧ	70	20	1
9	Баттерворта	250	ФВЧ	120	20	-
10	Чебышева	60	ФНЧ	180	25	2
11	Баттерворта	50	ФНЧ	120	28	-
12	Чебышева	170	ФВЧ	50	30	3
13	Баттерворта	120	ФВЧ	50	23	-
14	Чебышева	40	ФНЧ	160	25	1
15	Баттерворта	90	ФНЧ	230	28	-
16	Чебышева	180	ФВЧ	40	30	2
17	Баттерворта	200	ФВЧ	110	20	-
18	Чебышева	80	ФНЧ	210	25	3
19	Баттерворта	60	ФНЧ	140	28	-
20	Чебышева	150	ФВЧ	30	30	1
21	Баттерворта	90	ФВЧ	50	20	-
22	Чебышева	100	ФНЧ	290	25	2
23	Баттерворта	110	ФНЧ	260	28	-
24	Чебышева	190	ФВЧ	50	30	3
25	Баттерворта	180	ФВЧ	90	20	-
26	Чебышева	40	ФНЧ	160	25	1
27	Баттерворта	150	ФНЧ	340	28	-

Справочный материал

Таблица преобразований Лапласа

	$F(p)$	$f(t), t \geq 0$
1.	1	$\delta(t)$
2.	$\frac{1}{p}$	1
3.	$\frac{1}{p^2}$	t
4.	$\frac{1}{p+a}$	e^{-at}
5.	$\frac{p}{p+a}$	$\delta(t) - a e^{-at}$
6.	$\frac{a}{p(p+a)}$	$1 - e^{-at}$
7.	$\frac{1}{(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{b-a} (e^{-at} - e^{-bt})$
8.	$\frac{p}{(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{b-a} (be^{-bt} - ae^{-at})$
9.	$\frac{1}{(p+a)^2}$	te^{-at}
10.	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$	$\sin \omega t$
11.	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$	$\cos \omega t$
12.	$\frac{\omega}{(p+a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \sin \omega t$
13.	$\frac{p+a}{(p+a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \cos \omega t$
14.	$\frac{a^2}{p^2(p+a)}$	$at - (1 - e^{-at})$
15.	$\frac{1}{p(p+a)(p+b)}$	$\frac{1}{ab} \left[1 + \frac{1}{a-b} (be^{-at} - ae^{-bt}) \right]$
16.	$\frac{1}{p \left[(p+a)^2 + \omega^2 \right]}$	$\frac{1}{a^2 + \omega^2} \left[1 - e^{-at} \left(\cos \omega t + \frac{a}{\omega} \sin \omega t \right) \right]$



Система **Z**-параметров (рис. а):

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}$$

Система **H**-параметров (рис. а):

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix}$$

Система **Y**-параметров (рис. а):

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix}$$

Система **A**-параметров (рис. б):

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix}$$

A-параметры и входное сопротивление отрезка линии

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_B \sin \beta l \\ j\frac{1}{Z_B} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix}, \quad Z_{\text{вх}} = Z_B \frac{Z'_H + j \operatorname{tg} \beta l}{1 + jZ'_H \operatorname{tg} \beta l}, \quad Z'_H = \frac{Z_H}{Z_B}$$

Передаточные функции фильтров Баттерворта и Чебышева

Аппроксимация ФНЧ по Баттерворту:

$$K_P(\omega) = |K(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega / \omega_c)^{2n}}, \quad K_P(p) = \frac{1}{1 + (-1)^n (p / \omega_c)^{2n}}$$

Координаты полюсов ФНЧ Баттерворта ($p_H = p/\omega_c$):

$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
$p_{H1} = -1$	$p_{H1} = -0.707 + j0.707$	$p_{H1} = -1$	$p_{H1} = -0.383 + j0.924$
	$p_{H2} = -0.707 - j0.707$	$p_{H2} = -0.5 + j0.866$	$p_{H2} = -0.383 - j0.924$
		$p_{H3} = -0.5 - j0.866$	$p_{H3} = -0.924 + j0.383$
			$p_{H4} = -0.924 - j0.383$

Передаточная функция ФНЧ Баттерворта: $K(p) = \frac{1}{A(p)}$

$$n = 1 \quad A(p) = p_H + 1$$

$$\begin{aligned}
n = 2 & \quad A(p) = p_n^2 + \sqrt{2}p_n + 1 \\
n = 3 & \quad A(p) = (p_n + 1)(p_n^2 + p_n + 1) \\
n = 4 & \quad A(p) = (p_n^2 + 0,7653p_n + 1)(p_n^2 + 1,8477p_n + 1) \\
n = 5 & \quad A(p) = (p_n + 1)(p_n^2 + 0,618p_n + 1)(p_n^2 + 1,618p_n + 1)
\end{aligned}$$

Аппроксимация ФНЧ по Чебышеву:

$$K_P(\omega) = |K(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_n^2(\omega/\omega_c)}, \quad T_n(x) = \cos(n \arccos x),$$

$$T_0(x) = 1, \quad T_1(x) = x, \quad T_2(x) = 2x^2 - 1, \quad T_n(x) = 2x T_{n-1}(x) - T_{n-2}(x).$$

$$\text{При } |x| \gg 1 \quad T_n(x) \approx 2^{n-1} x^n.$$

Уравнение эллипса на комплексной плоскости, на котором располагаются полюсы функции $K(p)$ фильтров Чебышева:

$$\left(\frac{\operatorname{Re}(p)}{\operatorname{sh}(a)} \right)^2 + \left(\frac{\operatorname{Im}(p)}{\operatorname{ch}(a)} \right)^2 = \omega_c^2, \quad a = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{1}{\varepsilon} + \sqrt{\frac{1}{\varepsilon^2} + 1} \right),$$

координаты полюсов: $p_{k \text{ Чеб}} = \operatorname{Re}(p_{k \text{ Батт}}) \operatorname{sh}(a) + j \operatorname{Im}(p_{k \text{ Батт}}) \operatorname{ch}(a).$

Координаты полюсов ФНЧ Чебышева ($p_n = p/\omega_c$):

$n = 2$

$\varepsilon = 0,509$ (1 дБ)

$p_{н1} = -0,549 + j0,895$

$p_{н2} = -0,549 - j0,895$

$\varepsilon = 0,765$ (2 дБ)

$p_{н1} = -0,402 + j0,813$

$p_{н2} = -0,402 - j0,813$

$\varepsilon = 1$ (3 дБ)

$p_{н1} = -0,322 + j0,777$

$p_{н2} = -0,322 - j0,777$

$n = 3$

$\varepsilon = 0,509$ (1 дБ)

$p_{н1} = -0,494$

$p_{н2} = -0,247 + j0,966$

$p_{н3} = -0,247 - j0,966$

$\varepsilon = 0,765$ (2 дБ)

$p_{н1} = -0,369$

$p_{н2} = -0,184 + j0,923$

$p_{н3} = -0,184 - j0,923$

$\varepsilon = 1$ (3 дБ)

$p_{н1} = -0,299$

$p_{н2} = -0,149 + j0,904$

$p_{н3} = -0,149 - j0,904$

$n = 4$

$\varepsilon = 0,509$ (1 дБ)

$p_{н1} = -0,139 + j0,983$

$p_{н2} = -0,139 - j0,983$

$p_{н3} = -0,337 + j0,407$

$p_{н4} = -0,337 - j0,407$

$\varepsilon = 0,765$ (2 дБ)

$p_{н1} = -0,105 + j0,958$

$p_{н2} = -0,105 - j0,958$

$p_{н3} = -0,253 + j0,397$

$p_{н4} = -0,253 - j0,397$

$\varepsilon = 1$ (3 дБ)

$p_{н1} = -0,085 + j0,946$

$p_{н2} = -0,085 - j0,946$

$p_{н3} = -0,206 + j0,392$

$p_{н4} = -0,206 - j0,392$

Передаточная функция ФНЧ Чебышева:

$$K(p) = \frac{K_0}{A(p)}, \quad K_0 = \begin{cases} -\prod_{k=1}^n p_{nk}, & \text{если } n - \text{нечетное,} \\ \frac{\prod_{k=1}^n p_{nk}}{\sqrt{1+\varepsilon^2}}, & \text{если } n - \text{четное.} \end{cases}$$

$\varepsilon = 0.509$ (1 дБ)

$$n = 2 \quad A(p) = p_n^2 + 1,098p_n + 1,102$$

$$n = 3 \quad A(p) = (p_n + 0,494)(p_n^2 + 0,494p_n + 0,994)$$

$$n = 4 \quad A(p) = (p_n^2 + 0,279p_n + 0,987)(p_n^2 + 0,674p_n + 0,279)$$

$$n = 5 \quad A(p) = (p_n + 0,289)(p_n^2 + 0,179p_n + 0,988)(p_n^2 + 0,468p_n + 0,429)$$

$\varepsilon = 0.765$ (2 дБ)

$$n = 2 \quad A(p) = p_n^2 + 0,804p_n + 0,823$$

$$n = 3 \quad A(p) = (p_n + 0,369)(p_n^2 + 0,369p_n + 0,886)$$

$$n = 4 \quad A(p) = (p_n^2 + 0,21p_n + 0,929)(p_n^2 + 0,506p_n + 0,222)$$

$$n = 5 \quad A(p) = (p_n + 0,218)(p_n^2 + 0,353p_n + 0,393)(p_n^2 + 0,135p_n + 0,952)$$

$\varepsilon = 1$ (3 дБ)

$$n = 2 \quad A(p) = p_n^2 + 0,645p_n + 0,708$$

$$n = 3 \quad A(p) = (p_n + 0,299)(p_n^2 + 0,299p_n + 0,839)$$

$$n = 4 \quad A(p) = (p_n^2 + 0,17p_n + 0,903)(p_n^2 + 0,411p_n + 0,196)$$

$$n = 5 \quad A(p) = (p_n + 0,178)(p_n^2 + 0,11p_n + 0,936)(p_n^2 + 0,287p_n + 0,377)$$

Формулы перехода к фильтру-прототипу:

$$\text{ФВЧ: } \omega' = \frac{\omega_c^2}{\omega}, \quad p' = \frac{\omega_c^2}{p}, \quad \omega_B = \frac{\omega_c^2}{\omega_H}$$

$$\text{ПФ: } \omega' = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega}, \quad p' = \frac{p^2 + \omega_0^2}{p}, \quad \omega_c = \Pi, \quad \omega_B \approx 2\Delta\omega \text{ при } \Delta\omega \ll \omega_0.$$

Литература

1. Баскаков С.И. Лекции по теории цепей. – М.: Эдиториал УРСС, 2005. – 280 с. – ISBN 5-484-00178-1.
2. Гречихин В.А. Основы теории цепей. Руководство к решению задач анализа и синтеза двухполюсников и четырехполюсников. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 84 с. – ISBN 5-7046-0945-7.
3. Гречихин В.А. Основы теории цепей. Руководство к решению задач анализа линейных цепей с сосредоточенными параметрами. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 92 с. – ISBN 5-7046-7070-3.
4. Гречихин В.А., Шалимова Е.В. Основы теории цепей: Методические указания к использованию программного пакета MATHCAD при решении задач анализа цепей. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 48 с.