

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

**Методические указания к расчетным заданиям  
по курсу «Основы теории цепей»**

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Расчетное задание № 1.*

Анализ системы связанных колебательных контуров  
при гармоническом воздействии ..... 3

### *Расчетное задание № 2.*

Анализ нестационарных процессов в двухзвенной цепи 2-го порядка..... 7

Таблица преобразований Лапласа ..... 12

Литература ..... 13

**Расчетное задание № 1.**  
**Анализ системы связанных колебательных контуров**  
**при гармоническом воздействии**

**Содержание задания**

Имеется разветвленная цепь — система связанных контуров, схема и параметры которой заданы. На вход цепи включен источник гармонического сигнала (источник напряжения или источник тока):  $e(t)=E_0\cos(\omega_0 t + \varphi_e)$  или  $i(t)=I_0\cos(\omega_0 t + \varphi_i)$  с амплитудой  $E_0=1$  В,  $I_0=1$  мА, начальной фазой  $\varphi_e=\varphi_i=0$ . Частота колебаний  $\omega_0$  задана.

1. Изобразите приведенную в задании схему цепи. Отметьте и пронумеруйте ее узлы и главные контуры. Укажите на схеме выбранные условно-положительные направления и нумерацию токов ветвей и контурных токов главных контуров.
2. Составьте и запишите системы уравнений цепи по методам контурных токов и узловых напряжений.
3. Изобразите эквивалентные схемы замещения каждого из пассивных двухполюсников, входящих в состав цепи, считая их состоящими из последовательного соединения резистивного и реактивного элементов. Рассчитайте номинальные значения параметров этих элементов.
4. Используя результаты пп. 2 и 3, рассчитайте комплексные амплитуды токов и напряжений каждой из ветвей заданной цепи. Проверьте выполнение первого закона Кирхгофа для каждого из узлов цепи и второго закона Кирхгофа для всех главных контуров цепи. Приведите письменные комментарии по результатам расчета.
5. Постройте в масштабе векторные диаграммы токов для двух узлов цепи (первый узел – место соединения ветвей  $Z_2$  и  $Z_5$ , второй узел – место соединения ветвей  $Z_3$ ,  $Z_4$  и  $Z_5$ ) и напряжений для двух контуров (первый контур – ветви  $Z_2$ - $Z_4$ - $Z_5$ , второй контур – ветви  $Z_3$ - $Z_4$ - $Z_6$ ). При помощи диаграмм проиллюстрируйте выполнение I и II законов Кирхгофа. Дайте письменные комментарии.
6. Рассчитайте комплексные мощности электромагнитного процесса на каждом из двухполюсников, входящих в состав цепи, и проверьте выполнение баланса активных и реактивных мощностей. Дайте по этому поводу письменные комментарии.
7. Рассчитайте и постройте в масштабе амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики цепи для указанного выхода. При расчете считайте сопротивление  $Z_7$  бесконечно большим (обрыв ветви), а сопротивление  $Z_8$  — бесконечно малым (короткое замыкание ветви). Расчет проведите для двух значений сопротивления связи: для заданного значения  $Z_4$  и для  $2Z_4$ . Дайте письменные комментарии к результатам расчета.
8. Изобразите принципиальную электрическую схему цепи с учетом упрощений, введенных в пункте 7, и с указанием типов элементов и номинальных значений их параметров. Рассчитайте обобщенные параметры каждого из двух колебательных контуров полученной упрощенной цепи (резонансную частоту, добротность, полосу пропускания, резонансное сопротивление) и коэффициент связи контуров. Сделайте выводы по результатам расчета.

Схема 1.

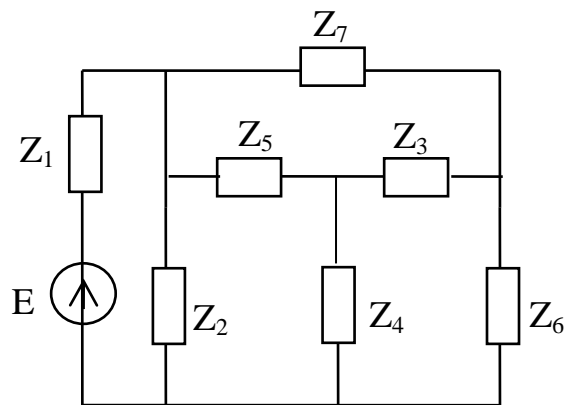


Схема 2.

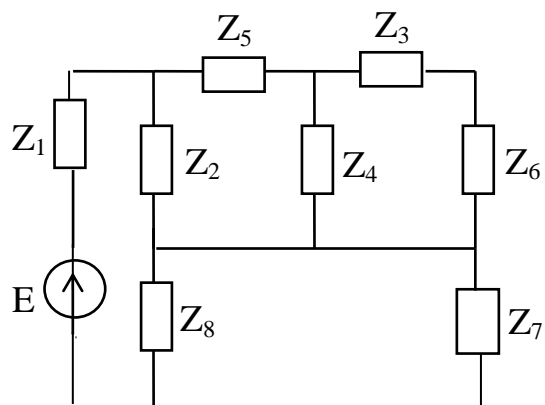


Схема 3.

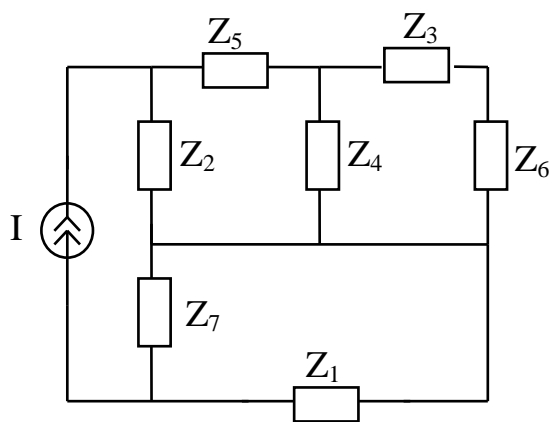


Схема 4.

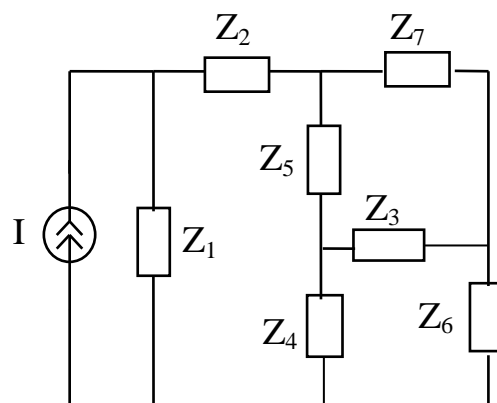


Таблица заданий

Номер по журналу	$\omega_0$ , с <sup>-1</sup>	$Z_1$ кОм	$Z_2=Z_6$ Ом	$Z_3=Z_5$ Ом	$Z_4$ Ом	$Z_7$ МОм	$Z_8$ Ом	Схема Выход
1	$2.1 \cdot 10^6$	700	3+j600	2-j600	-j5	-j0.6	—	1, $U_3$
2	$3.1 \cdot 10^6$	800	3+j900	4-j900	-j10	0.004	-j2	2, $U_3$
3	$4.1 \cdot 10^6$	18	5-j1200	4+j1200	j14	0.002	—	3, $U_3$
4	$5.1 \cdot 10^6$	0.003	5-j2000	6+j2000	j25	-j0.6	—	4, $U_3$
5	$6.1 \cdot 10^6$	750	8+j1800	7-j1800	-j20	-j0.8	—	1, $I_3$
6	$2.2 \cdot 10^6$	650	3+j800	5-j800	-j10	0.005	-j3	2, $I_6$
7	$3.2 \cdot 10^6$	15	4-j1200	3+j1200	j15	0.003	—	3, $I_3$
8	$4.2 \cdot 10^6$	0.005	4-j1600	5+j1600	j18	-j0.8	—	4, $I_3$
9	$5.2 \cdot 10^6$	800	7+j1500	6-j1500	-j15	-j0.9	—	1, $U_6$
10	$6.2 \cdot 10^6$	750	8+j2400	9-j2400	-j20	0.003	-j3	2, $U_6$
11	$2.3 \cdot 10^6$	0.15	4-j1000	5+j1000	j12	0.004	—	3, $U_6$
12	$3.3 \cdot 10^6$	.003	3-j1500	2+j1500	j13	-j0.8	—	4, $U_6$
13	$4.3 \cdot 10^6$	750	5+j1200	6-j1200	-j14	-j0.9	—	1, $I_6$
14	$5.3 \cdot 10^6$	800	7+j2000	6-j2000	-j15	0.008	-j4	2, $I_3$
15	$6.3 \cdot 10^6$	8	10-j3000	11+j3000	J25	0.005	—	3, $I_6$
16	$2.4 \cdot 10^6$	0.005	4-j1400	5+j1400	j12	-j0.7	—	4, $I_6$
17	$3.4 \cdot 10^6$	700	7+j2000	8-j2000	-j13	-j0.8	—	1, $U_6$
18	$4.4 \cdot 10^6$	750	9+j3000	8-j3000	-j28	0.005	-j2	2, $I_6$
19	$5.4 \cdot 10^6$	2	8-j2000	6+j2000	j23	0.004	—	3, $I_3$
20	$6.4 \cdot 10^6$	.003	7-j2000	9+j2000	j14	-j0.8	—	4, $I_3$
21	$2.5 \cdot 10^6$	700	8+j2200	7-j2200	-j15	-j0.9	-	1, $I_6$
22	$3.5 \cdot 10^6$	800	10+j3000	9-j3000	-j25	0.004	-j3	2, $I_6$
23	$4.5 \cdot 10^6$	-j0.15	9-j2500	10+j2500	j28	0.005	-	3, $U_3$
24	$5.5 \cdot 10^6$	0.003	7-j1900	6+j1900	j13	-j0.8	-	4, $I_3$
25	$6.5 \cdot 10^6$	0.003	4+j2100	5-j2100	j14	-j0.9	-	4, $U_6$
26	$2.6 \cdot 10^6$	0.4	5-j1000	4+j1000	j10	0.004	—	3, $U_6$
27	$3.6 \cdot 10^6$	0.005	2-j1500	3+j1500	j12	-j0.9	—	4, $U_6$
28	$4.6 \cdot 10^6$	800	6+j1200	5-j1200	-j13	-j0.9	—	1, $I_6$
29	$5.6 \cdot 10^6$	700	7+j2000	5-j2000	-j18	0.008	-j4	2, $I_3$
30	$6.6 \cdot 10^6$	3	11-j3000	10+j3000	j28	0.005	—	3, $I_6$

Значения комплексных сопротивлений приведены для частоты  $\omega_0$ .

### Методические указания

1. Изобразите схему исследуемой цепи. На схеме укажите обозначения всех двухполюсников ( $Z_n$ ) цепи и выбранные условно-положительные направления токов всех ее ветвей. Пронумеруйте узлы цепи. При нумерации токов ветвей ориентируйтесь на номер включенного в данную ветвь элемента. Отметьте и пронумеруйте главные контуры цепи и укажите направления обхода каждого из них. Приведите таблицу с заданными для вашего варианта значениями параметров цепи и входного воздействия.

2. Составьте и запишите системы уравнений цепи по методу контурных токов (МКТ) и методу узловых напряжений (МУН). Считайте при этом формально токи и напряжения ветвей цепи постоянными, а двухполюсники  $Z_n$  – резистивными.

3. Используя алгебраическую форму записи комплексных сопротивлений двухполюсников цепи, найдите последовательные эквивалентные схемы замещения каждого из двухполюсников. По заданным значениям комплексных сопротивлений на частоте  $\omega_0$  определите параметры этих эквивалентных схем ( $R, L, C$ ).

4. Используя результаты п.2, запишите системы уравнений цепи по МКТ и МУН для гармонического воздействия в комплексной форме. Проведите расчет комплексных амплитуд токов и напряжений ветвей цепи одним из изученных методов анализа сложных цепей (МКТ или МУН) на заданной частоте  $\omega_0$ . Результаты расчета представьте в алгебраической и экспоненциальной форме записи комплексных чисел и сведите в таблицу. Приведите числовые выражения, показывающие выполнение законов Кирхгофа для найденных значений токов и напряжений.

5. Постройте векторные диаграммы токов и напряжений в соответствии с заданием, изображая складываемые векторы в виде непрерывной цепочки: последующий вектор выходит из конца предыдущего. При построении диаграмм используйте одинаковые масштабы по осям абсцисс и ординат. Сделайте на основании полученных диаграмм выводы о соответствии результатов расчета законам Кирхгофа.

6. Используя результаты п.4, рассчитайте комплексные мощности электромагнитного процесса на каждом из двухполюсников цепи, включая источник. Запишите условие баланса мощностей в схеме в общем виде и для полученных числовых значений, представив эти комплексные значения в алгебраической форме записи. Сделайте вывод о том, на что расходуется мощность источника питания в данной схеме.

7. Используя методы эквивалентных преобразований, получите выражение для комплексного коэффициента передачи упрощенной цепи в виде дробно-рациональной функции. Запишите выражения для модуля и фазы коэффициента передачи как функций частоты. Проведите расчет значений модуля и фазы коэффициента передачи цепи в полосе частот от  $\omega_0 - 0.05\omega_0$  до  $\omega_0 + 0.05\omega_0$  для двух значений сопротивления  $Z_4$ . Постройте амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики цепи в указанной полосе частот не менее чем по 15 рассчитанным точкам. Для сравнения между собой характеристик, рассчитанных для разных значений сопротивления связи  $Z_4$ , постройте их на одних и тех же рисунках (на одном рисунке – две АЧХ, на другом – две ФЧХ). Сделайте выводы об избирательных свойствах цепи.

8. Используя найденные в п.3 последовательные схемы замещения двухполюсников цепи, изобразите принципиальную электрическую схему цепи с учетом упрощений, введенных в п.7 задания, и с указанием типов элементов и номинальных значений их параметров. По обычным правилам рассчитайте обобщенные параметры каждого из отдельно взятых колебательных контуров системы (резонансную частоту, добротность, полосу пропускания, резонансное сопротивление) и коэффициент связи контуров. Сделайте выводы по полученным результатам.

***Расчетные задания, выполненные с отклонением от указанных требований, на проверку не принимаются и не оцениваются.***

### **Сроки выполнения**

**6 неделя – пп.1, 2; 10 неделя – пп.3, 4, 5; 12 неделя – пп.6, 7; 14 неделя – п.8**

## Расчетное задание № 2. Анализ нестационарных процессов в двухзвенной цепи 2-го порядка

### Содержание задания

Электрическая цепь состоит из двух звеньев первого порядка – активного и пассивного, разделенных трансформатором сопротивлений, который имеет коэффициент передачи по напряжению  $K_U = 1$ , входное сопротивление, равное бесконечности, и выходное, равное нулю (рис. 1). Схемы пассивных звеньев цепи для разных вариантов приведены на рис. 2, а схемы активных звеньев – на рис. 3. Параметры элементов цепи и входного воздействия приведены в таблице заданий.

1. Рассчитайте коэффициенты передачи каждого из звеньев и всей цепи, постройте соответствующие графики АЧХ и ФЧХ, предварительно определив параметры элементов, отсутствующие в задании. Дайте письменные комментарии по поводу полученных зависимостей.

2. Запишите выражения для операторных коэффициентов передачи каждого из звеньев и всей цепи. Используя их, получите выражения для переходных характеристик каждого из звеньев и всей цепи в целом. Постройте временные диаграммы этих характеристик и сделайте выводы о характере и длительности переходных процессов.

3. На вход цепи подается импульс напряжения (тока), форма и параметры которого заданы (рис. 4). Рассчитайте и постройте на одном рисунке временные диаграммы напряжений на выходе первого звена  $u_1(t)$  и выходе всей цепи  $u_2(t)$ . Дайте письменные комментарии к результатам расчета.

4. Рассчитайте и постройте временные диаграммы напряжения на выходе цепи  $u_2(t)$  для случая, когда на входе устройства действует пачка из 5 импульсов заданной формы (рис. 4), следующих с периодом  $T$ . Дайте письменные комментарии по поводу полученных результатов.

### Методические указания

1. При выводе формул для комплексных коэффициентов передачи учесть, что в некоторых вариантах заданий входным воздействием на цепь является ток. При расчете и построении АЧХ и ФЧХ верхнее значение частоты ограничить значением, при котором модуль коэффициента передачи равен  $0.1K_{\max}$  (если при  $\omega \rightarrow \infty K \rightarrow 0$ ) или  $0.9K_{\max}$  (если при  $\omega \rightarrow \infty K \rightarrow K_{\max}$ ), где  $K_{\max}$  — максимальное значение коэффициента передачи. По оси абсцисс откладывать циклическую частоту (в МГц или кГц). Приблизительные размеры этих и всех последующих графиков:  $\sim 200$  мм по оси абсцисс и  $\sim 150$  мм по оси ординат.

2. При записи выражений для операторных коэффициентов передачи использовать полученные в п. 1 соотношения для комплексных коэффициентов передачи. Аналитические выражения для переходных характеристик должны быть получены с помощью таблиц преобразований Лапласа и записаны в явном виде с использованием алгебраических функций.

3. В данном пункте расчета должны быть получены в явном виде аналитические выражения для напряжений  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ . На том же графике, где изображаются временные диаграммы выходных импульсов, пунктирными линиями изобразить в измененном масштабе входной импульс  $e(t)K_{\max}$  (или  $i(t)K_{\max}$ ). Иметь в виду, что значения  $K_{\max}$  для разных выходов разные.

4. Анализ цепи при воздействии на ее вход пачки импульсов проводить с использованием принципа суперпозиции и результатов выполнения п. 3.

**Письменные комментарии по каждому из пунктов задания** должны содержать физическое объяснение хода полученных зависимостей, выводы о характере, степени и причинах искажений входных импульсов, связи этих искажений с переходными характеристиками цепей, а также соображения о возможности уменьшения этих искажений (следует дать рекомендации о необходимом изменении переходных характеристик цепей и параметров их элементов).

На графиках функций должна присутствовать удобная для восприятия масштабная сетка, указаны размерности по осям координат.

**Расчетные задания принимаются на проверку при условии выполнения вышеуказанных требований по содержанию и оформлению.**

### Сроки выполнения

Пункт 1 – 4-я неделя, пункт 2 – 6-я неделя, пункт 3 – 8-я неделя, пункт 4 – 10-я неделя. Каждый пункт ТР сдается на проверку по мере выполнения в комплекте с ранее выполненными пунктами. **Срок окончательной сдачи выполненного ТР – 10-я неделя.**

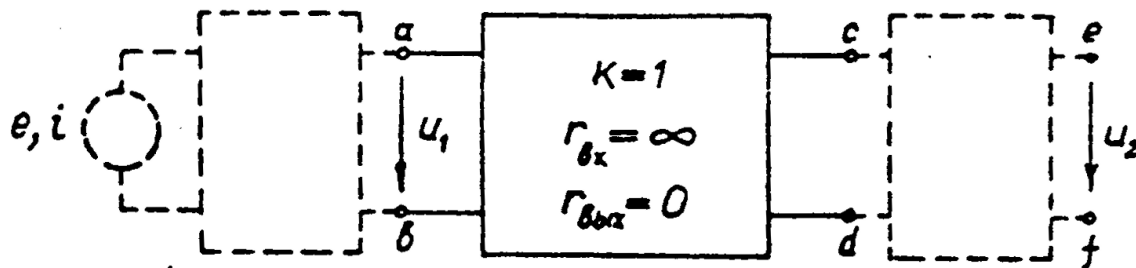


Рис. 1

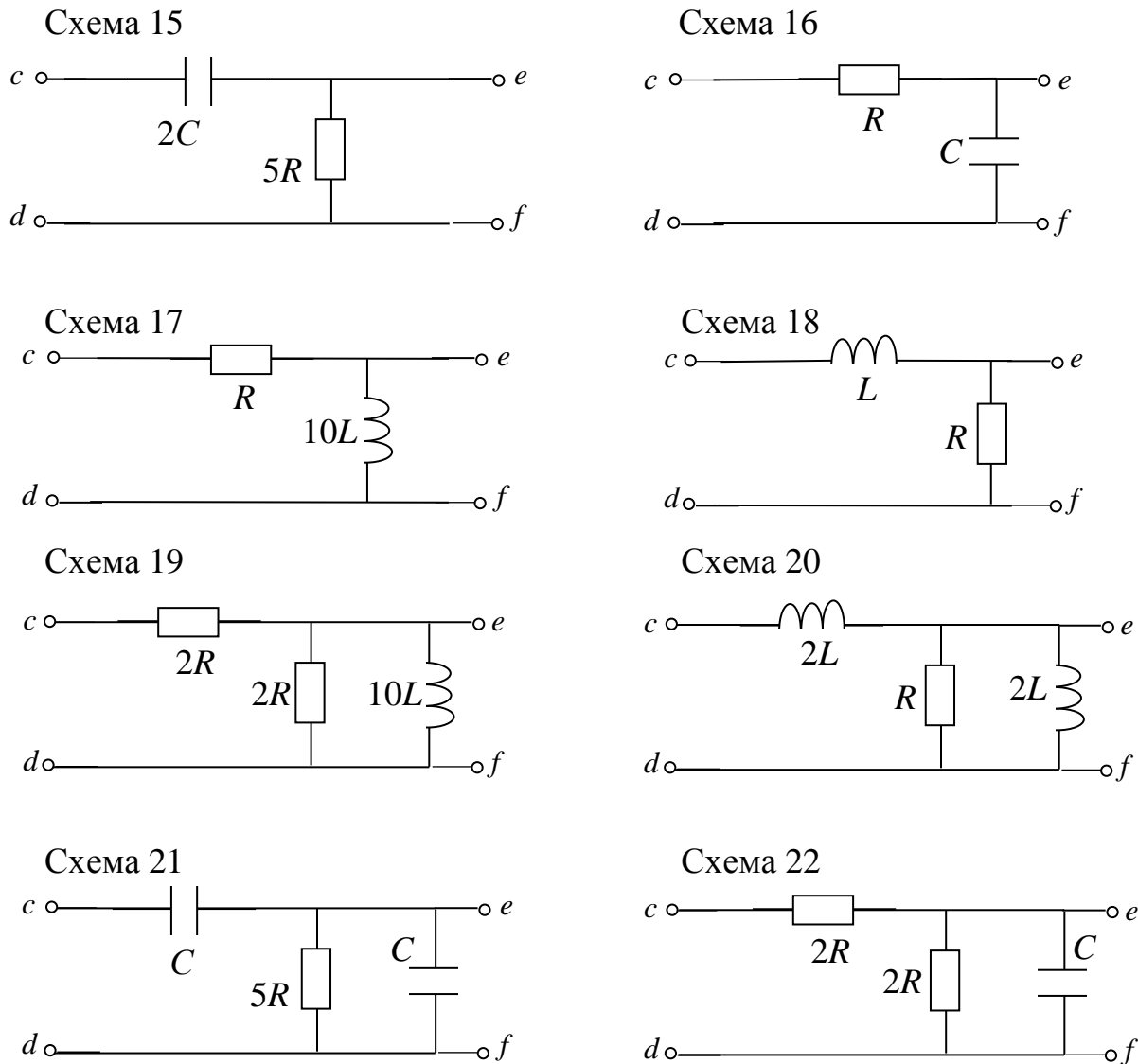


Рис. 2



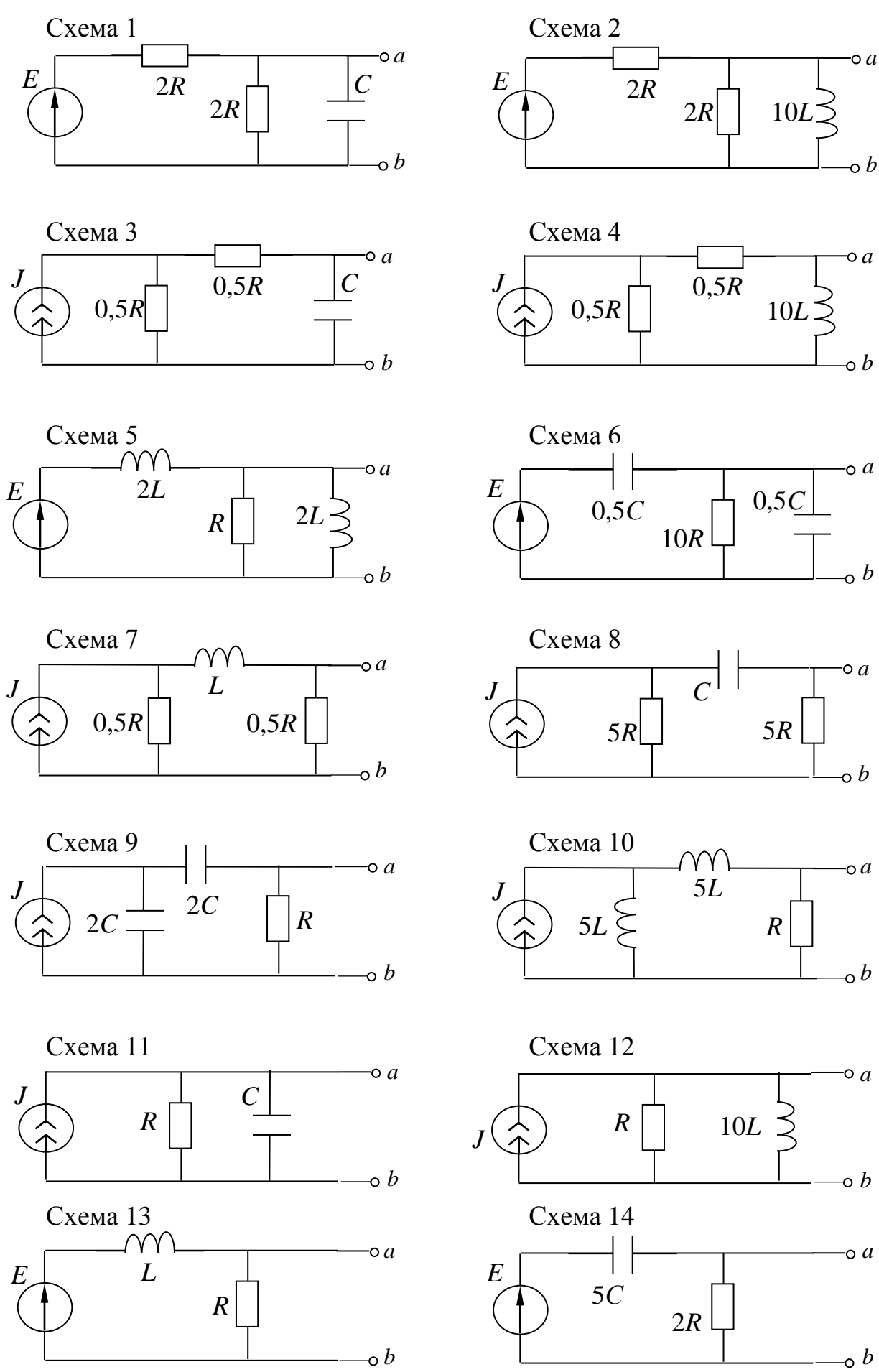


Рис.3

Таблица заданий

№ по журналу	Цепи	R, кОм	RC или L/R, мкс	Длительность импульса $T_{и}$ , мкс	T, мкс	Импульс	Амплитуда импульса A, В (мА)
1	3, 19	2.2	80	100	130	17	7.0
2	5, 15	5.1	130	150	170	19	5.0
3	6, 18	3.1	50	60	70	1	2.5
4	9, 17	8.1	90	100	140	18	10
5	13, 21	11	155	160	190	3	4.5
6	3, 17	3.1	75	90	110	16	2.5
7	1,19	2.4	245	260	290	4	8
8	11, 19	2.2	30	40	60	20	10
9	6, 20	2.2	70	90	140	2	7.5
10	7, 15	5.1	100	110	130	15	3.5
11	10, 22	6.2	200	210	220	21	6.0
12	13, 15	1.1	65	70	110	5	3.5
13	9, 21	4.2	55	60	90	22	7.0
14	7, 19	5.1	190	180	210	23	7.5
15	1, 17	1.5	25	30	50	6	3.5
16	4, 22	4.1	95	110	140	7	5.5
17	7, 21	6.3	120	140	160	24	9.0
18	12, 22	4.2	85	100	130	14	2.0
19	14, 20	1.3	115	120	140	8	6.5
20	2, 22	4.3	105	120	150	12	4.5
21	5, 21	8.1	205	220	250	4	6.0
22	8, 18	2.2	75	80	110	9	3.5
23	11, 17	3.3	65	70	100	10	7.5
24	8, 20	7.2	230	250	280	5	5.5
25	2, 16	3.3	70	80	100	13	0.5
26	10, 16	5.1	20	25	35	11	0.5
27	4, 16	6.2	45	50	80	17	3.5
28	9, 19	4.3	30	40	90	6	2.5
29	12, 16	4.2	95	100	130	20	3.0
30	14, 18	5.6	25	30	50	23	2.5

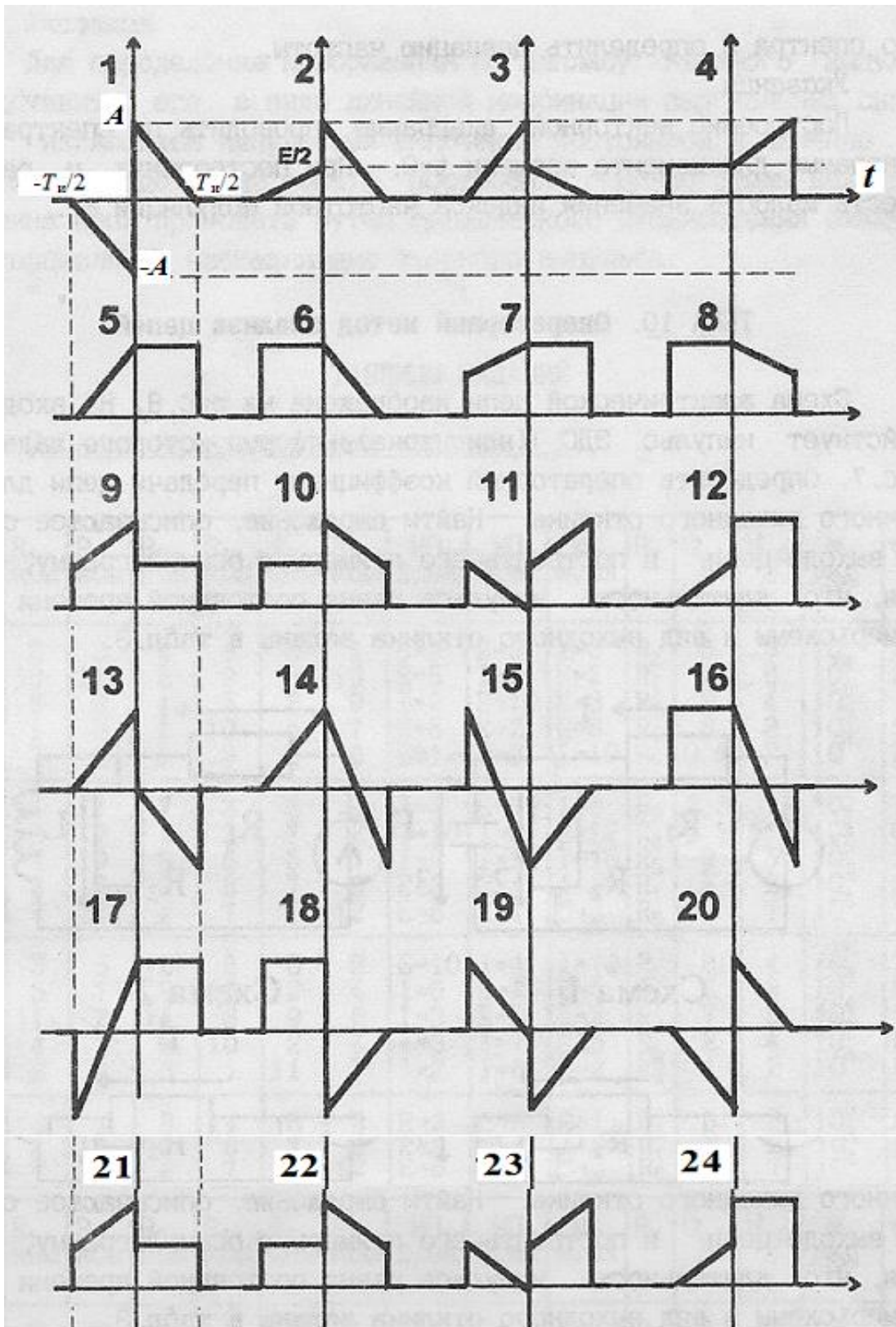


Рис. 4

### 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.	$\frac{1}{(p+a)^2}$	$t e^{-at}$
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.	$\frac{1}{p \left[ (p+a)^2 + \omega^2 \right]}$	$\frac{1}{a^2 + \omega^2} \left[ 1 - e^{-at} \left( \cos \omega t + \frac{a}{\omega} \sin \omega t \right) \right]$

## Литература

1. Баскаков С.И. Лекции по теории цепей. – М.: Либроком, 2009. – 280 с.
2. Гречихин В.А. Основы теории цепей. Руководство к решению задач анализа линейных цепей с сосредоточенными параметрами. – М.: Изд. МЭИ, 2002. – 80 с.
3. Гречихин В.А. Основы теории цепей. Руководство к решению задач анализа и синтеза двухполюсников и четырехполюсников. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 84 с.
4. Гречихин В.А., Шалимова Е.В. Основы теории цепей. Методические указания к использованию программного пакета MATHECAD при решении задач анализа цепей. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 48 с.