ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Северо-Кавказский филиал ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»

Методические указания

по выполнению контрольной работы

по дисциплине Электротехника

(направление подготовки 09.03.01)

Ростов-на-Дону
2019

Методические указания

по выполнению контрольной работы

по дисциплине Электротехника

Составитель: А.В. Бородин, доцент

Рассмотрено и одобрено
на заседании кафедры ОНП

Протокол от «26» августа 2019г №1

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью освоения дисциплины «Электротехника, электроника и схемотехника» является формирование у студентов знаний основ теории электрических цепей, элементной базы электроники и микроэлектроники, аналоговой и цифровой схемотехники, формирование у студентов навыков эффективного решения практических задач.

Дисциплина «Электротехника, электроника и схемотехника» состоит из трех частей:

1. Электротехника.
2. Электроника.
3. Схемотехника.

Первая часть «Электротехника» содержит следующие разделы: основные законы теории электрических и магнитный цепей; переходные процессы во временной области; анализ установившегося режима в цепях синусоидального тока; трёхфазные цепи; многополюсные цепи; использование преобразований Лапласа для анализа цепей; передаточная функция и её связь с дифференциальным уравнением, с импульсной и частотными характеристиками.

Вариант задания определяется по двум последним цифрам номера студенческого билета: последняя цифра – N_0; предпоследняя – N_1.

Задача 1

Задана цепь (рисунок 3). Величины всех сопротивлений приведены в таблице 3. Задано значение тока в одной из ветвей, это значение приведено в таблице 4.

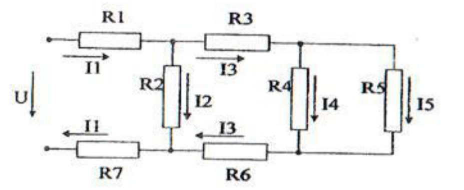


Рис.3

Требуется:

1. Определить токи в остальных ветвях и входное напряжение.
2. Используя найденные значения входного тока и входного напряжения, рассчитать входное сопротивление.
3. Рассчитать входное сопротивление, используя эквивалентные преобразования схемы; сравнить с результатом, полученным в пункте 2.

Таблица 3

N_1	Сопротивления, (Ом)						
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
1	5.12	4.39	1.74	3.29	2.15	1.56	3.50
2	4.62	5.81	3.79	2.81	1.71	3.42	4.03
3	4.03	3.78	5.20	1.85	2.75	3.10	4.59
4	4.99	4.17	3.52	2.28	1.68	4.17	3.25
5	3.18	1.75	5.63	1.84	2.39	3.40	2.85
6	3.55	2.17	1.75	5.13	4.44	3.45	1.79
7	5.82	2.45	3.20	4.20	1.75	3.75	2.57
8	1.80	3.45	4.32	5.07	1.86	2.28	3.45
9	3.28	1.64	3.50	2.26	3.89	5.19	4.20
0	3.58	1.67	2.29	3.46	1.82	5.10	2.16

Таблица 4

N_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ток, (А)	I_1=1.5	I_1=1.3	I_2= =0.83	I_2= =0.75	I_3= =0.65	I_3= =0.88	I_4= =0.48	I_4= =0.37	I_5= =0.52	I_5= =0.33

Задача 2

Задана цепь гармонического тока (рис. 4). В таблице 6 приведены комплексные сопротивления всех элементов. В таблице 5 задана одна из следующих величин: напряжения Uaв, Uбв, Uaб или токи I_1, I_2, I_3. Требуется:

1. Начертить схему, элементы которой соответствуют заданным комплексным сопротивлениям.
2. По заданной величине найти все токи в ветвях и напряжения Uaв, Uaб, Uбв.
3. На комплексной плоскости построить три вектора токов и три вектора напряжений и графически проверить правильность решения задачи с использованием первого и второго законов Кирхгофа.

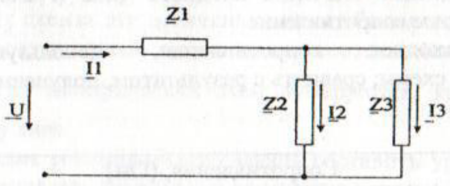


Рис. 4

Таблица 5

N_1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I, (A) U, (B)	I_3= =0.85	Uaб= =21.4	Uaб= =18.9	Uбв= =14.5	Uбв= =16.5	Uaв= =33.4	Uaв= =41.7	I_1= =1.27	I_1= =0.91	I_2= =0.75

Таблица 6

$\underline{Z}$, Ом	N_0									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\underline{Z}_1$	10.5	12.6	8.6	j9.5	j8.3	j7.1	-j9.1	-j8.4	-j6.3	10.4
$\underline{Z}_2$	j9.1	j8.5	j9.1	8.5	9.3	8.9	j7.9	j9.9	j9.2	j8.5
$\underline{Z}_3$	-j8.8	-j9.9	-j5.7	-j7.1	-j6.9	-j9.5	10.7	9.87	9.66	-j9.6

Задача 3

На рисунках 6.(0 … 9) изображены электрические схемы. Номер схемы Вашего варианта определяется в соответствии со значением N_0, а параметры элементов определяются в соответствии со значением N_1 по таблице 7. На рисунке 7 изображён график входного сигнала.

Таблица 7

N_1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R, кОм	1.0	2.2	3.4	4.5	5.5	1.4	3.6	2.5	5.2	1.5
L, мГн	2.2	1.5	4.1	5.2	1.6	8.5	2.8	3.6	4.5	7.5
C, нФ	3.4	1.8	1.5	2.4	3.1	2.8	1.5	1.8	2.2	1.4

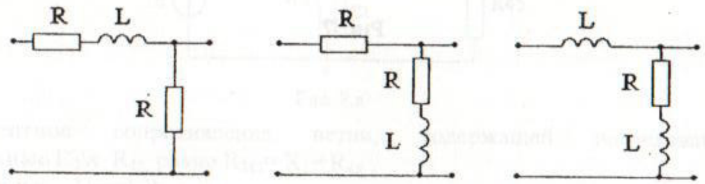
3.1. Определить следующие характеристики цепи:

- комплексную передаточную функцию по напряжению $H(j\omega)$ (построить графики её АЧХ $H(\omega)$ и ФЧХ $\theta(\omega)$; по эквивалентным схемам цепи для ω = 0 и $\omega = \infty$ определить значения $H(0)$ и $H(\infty)$ и по этим значениями проверить правильность расчёта АЧХ;
- операторную передаточную функцию по напряжению $H(p)$;
- переходную характеристику $h(t)$, построить график.

3.2. Определить $S_{ВХ}(j\omega)$ - комплексную спектральную плотность сигнала, представленного на рисунке 7; рассчитать и построить график амплитудного спектра $S_{ВХ}(\omega)$.

3.3. Определить $S_{ВЫХ}(j\omega)$ - комплексную спектральную плотность сигнала на выходе цепи; рассчитать и построить график амплитудного спектра $S_{ВЫХ}(\omega)$.

3.4. Определить функцию мгновенного напряжения на выходе цепи $u_{ВЫХ}(t)$; построить график.



0) 1) 2)

Рис. 6 (0 .. 2)

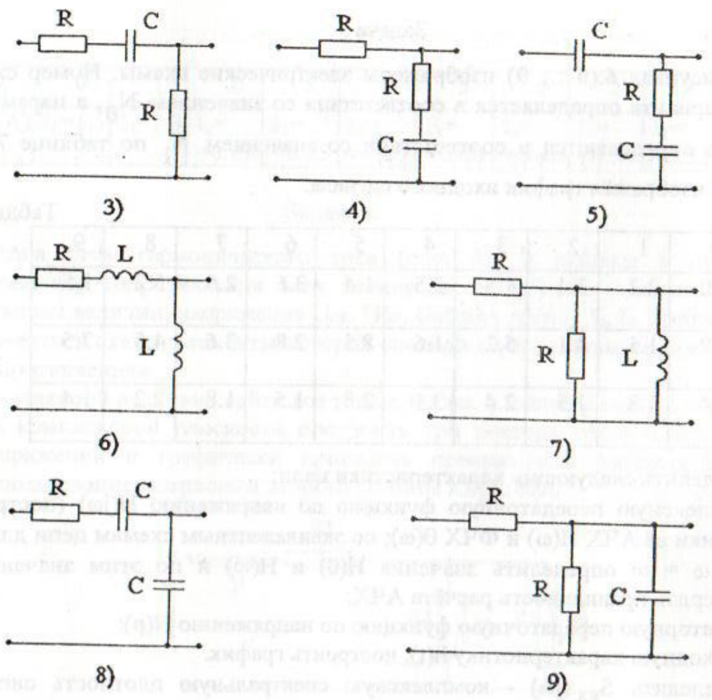
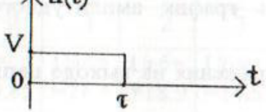


Рис. 6.(3 .. 9)



Для всех вариантов:
V = 5 вольт
τ = 5 микросекунд

Рис. 7

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

ЗАДАЧА 1

Прежде чем приступить к выполнению Задачи 1 рекомендуется разобрать по [2] решение задач 1.9 (только расчётные формулы) и 1.15.

Для решения Задачи 1 следует пользоваться непосредственно законами Кирхгофа, Ома, а также формулами эквивалентного преобразования сопротивлений.

Рассмотрим схему на рисунке 8.

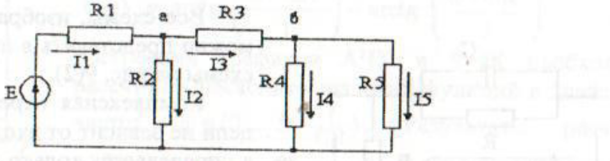


Рис. 8

Задано напряжение Uаб. Найти токи всех резисторов и величину э.д.с. Е.

Решение.

Зная напряжение $U_{аб}$, можно рассчитать ток: $I_3 = \frac{U_{аб}}{R_3}$.

Резисторы R_4 и R_5 включены параллельно, можно рассчитать эквивалентное сопротивление: $R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}$.

Если заменить резисторы R_4 и R_5 одним резистором R_{45}, то R_{45} и R_3 будут включены последовательно (рисунок 8.а).

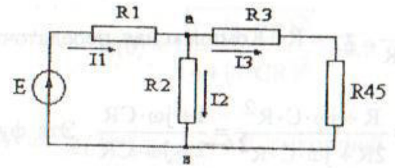


Рис. 8.а

Эквивалентное сопротивление ветви, содержащей последовательно соединённые R_3 и R_{45}, равно $R_{345} = R_3 + R_{45}$.

Напряжение: $U_{ав} = I_3 R_{345}$.

Ток в резисторе R_2 равен: $I_2 = U_{ав} / R_2$.

Ток в резисторе R_1 определяется как: $I_1 = I_2 + I_3$.

Величина э.д.с. Е равна: $E = I_1 R_1 + U_{ав}$.

Задача 2

Прежде чем приступить к решению этой задачи рекомендуется разобрать главу 6 в [1].

Задача 3

Методические указания к выполнению задания 3.1.

1. Изобразите схему Вашего варианта задания в соответствии со значением N_0 (рис. 6) и составьте таблицу значений параметров элементов схемы в соответствии со значением N_1 (табл. 7).

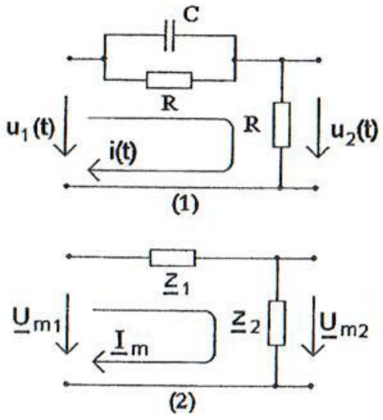


Рис.9

Все схемы, изображённые на рис. 6, можно представить в виде эквивалентной схемы на рис. 9(2).

Комплексная передаточная функция цепи не зависит от входного воздействия, а определяется только структурой цепи и параметрами её элементов. Для простоты вычислений допустим, что на вход цепи подаётся гармонический сигнал, определяемый значением комплексной амплитуды: $\underline{U}_{m1}$. Тогда комплексное амплитудное значение тока в контуре будет равно: $\underline{I}_{m1} = \frac{\underline{U}_{m1}}{\underline{z}_1 + \underline{z}_2}$, а комплексное амплитудное значение напряжения на выходе цепи: $\underline{U}_{2m} = \underline{I}_{1m} \cdot \underline{z}_2 = \frac{\underline{U}_{1m}}{\underline{z}_1 + \underline{z}_2} \cdot \underline{z}_2$.

Для схемы на рисунке 9(1) $\underline{z}_1 = \dfrac{R \cdot \frac{1}{j\omega \cdot C}}{R + \frac{1}{j\omega \cdot C}} = \dfrac{R}{1 + j\omega \cdot CR}$, $\underline{z}_2 = R$. Комплексная передаточная функция цепи:

$$H(j\omega) = \frac{\underline{U}_{m2}}{\underline{U}_{m1}} = \frac{\underline{z}_2}{\underline{z}_1 + \underline{z}_2} = \frac{R + j\omega \cdot C \cdot R^2}{2R + j\omega \cdot C \cdot R^2} = \frac{1 + j\omega \cdot CR}{2 + j\omega \cdot CR}.$$

Эта функция может быть представлена в показательной форме:

$$H(j\omega) = \frac{\sqrt{1 + (\omega \cdot CR)^2} \cdot e^{j \cdot \mathrm{arctg}\left(\frac{\omega \cdot CR}{1}\right)}}{\sqrt{4 + (\omega \cdot CR)^2} \cdot e^{j \cdot \mathrm{arctg}\left(\frac{\omega \cdot CR}{2}\right)}}.$$

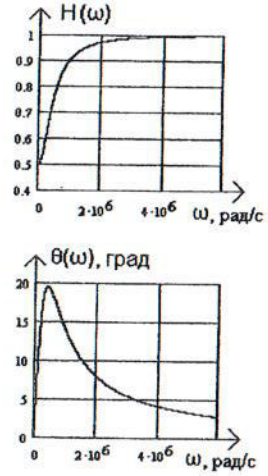


Рис. 10

2. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – это зависимость модуля комплексной функции от частоты. АЧХ передаточной функции по напряжению:

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{1 + (\omega \cdot CR)^2}{4 + (\omega \cdot CR)^2}}.$$

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) – это зависимость аргумента комплексной функции от частоты. ФЧХ передаточной функции по напряжению:

$$\theta(\omega) = \mathrm{arctg}\left(\frac{\omega \cdot CR}{1}\right) - \mathrm{arctg}\left(\frac{\omega \cdot CR}{2}\right).$$

Для построения графиков АЧХ и ФЧХ необходимо рассчитать несколько значений функций в диапазоне частот $\omega \in (0 \ldots 5 \cdot \frac{1}{CR})$. Результаты расчётов представлены в таблице 8. Графики АЧХ и ФЧХ показаны на рисунке 10.

Эквивалентные схемы на частотах $\omega = 0$ и $\omega = \infty$ показаны на рисунке 11. Сопротивление емкостного элемента зависит от частоты: $\underline{z}_C = \frac{1}{j\omega \cdot C}$. Модуль сопротивления: $|\underline{z}_C| = \frac{1}{\omega \cdot C}$. На частоте $\omega = 0$, $|\underline{z}_C(0)| = \frac{1}{0 \cdot C} \to \infty$ емкостной элемент эквивалентен ветви с бесконечно большим сопротивлением (на рисунке ветвь разомкнута), модуль передаточной функции равен

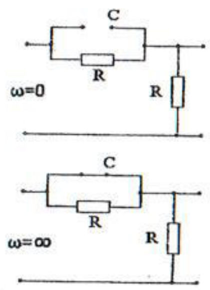


Рис. 11

$$H(0) = \sqrt{\frac{1 + (0 \cdot CR)^2}{4 + (0 \cdot CR)^2}} = 0.5.$$

На частоте $\omega \to \infty$, $|\underline{z}_C(\infty)| = \frac{1}{\infty \cdot C} \to 0$ емкостной элемент эквивалентен ветви с бесконечно малым сопротивлением (ветвь замкнута), модуль передаточной функции равен $H(\infty) = \sqrt{\frac{1 + (\infty \cdot CR)^2}{4 + (\infty \cdot CR)^2}} = \sqrt{\frac{(\infty \cdot CR)^2}{(\infty \cdot CR)^2}} = 1$.

Таблица 8

ω, рад/с	0	1/RC	2/RC	3/RC	4/RC	5/RC	∞
	0	$2.8\cdot10^5$	$5.6\cdot10^5$	$8.4\cdot10^5$	$11.2\cdot10^5$	$14.0\cdot10^5$	∞
H(ω)	0.5	0.63	0.79	0.87	0/92	0.95	1
θ(ω), град	0	18.4	18.4	15.2	12.5	10.5	0

3. Для определения операторной передаточной функции по напряжению H(p) необходимо составить операторную схему замещения и выполнить те же действия, что и для определения H(jω). Поэтому операторную передаточную функцию H(p) можно найти, заменив $j\omega \div p$ в выражении H(jω). Для цепи (рис. 9) операторная передаточная функция по напряжению $H(p)=\dfrac{1+p\cdot CR}{2+p\cdot CR}$.

4. Переходная характеристика h(t) численно совпадает с реакцией цепи на воздействие в виде единичной ступенчатой функции 1(t): $h(t)=u_2(t)\Big|_{u_1(t)=1(t)}$.

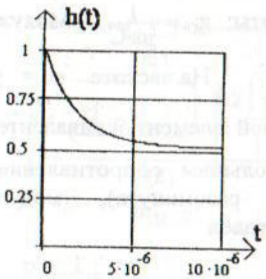


Рис. 12

Изображение функции $1(t)\ \div\ \dfrac{1}{p}$

Операторное выражение реакции цепи $U_2(p)$ на воздействие $U_1(p)=\dfrac{1}{p}$ определяется с использованием операторной передаточной функции по напряжению: $U_2(p)=U_1(p)\cdot H(p)=\dfrac{H(p)}{p}$. Для цепи (рис. 9) изображение переходной характеристики равно:

$$\frac{H(p)}{p}=\frac{1+p\cdot CR}{p\cdot(2+p\cdot CR)}=\frac{CR\cdot(p+\frac{1}{CR})}{CR\cdot p\cdot(p+\frac{2}{CR})}=\frac{p+\frac{1}{CR}}{p\cdot(p+\frac{2}{CR})}=\frac{F_1(p)}{F_2(p)}.$$

Если степень полинома знаменателя выше степени полинома числителя, переход к оригиналу можно выполнить с использованием теоремы разложения:

- корни полинома знаменателя: $p_1=0,\quad p_2=-\dfrac{2}{CR}$;

- производная полинома знаменателя: $F_2'(p)=2\cdot p+\dfrac{2}{CR}$;

- $h(t)=\sum\limits_k\left(\dfrac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)}\cdot\exp(p_k\cdot t)\right)=\dfrac{0+\frac{1}{CR}}{2\cdot0+\frac{2}{CR}}\cdot\exp(0\cdot t)+\dfrac{\left(-\frac{2}{CR}\right)+\frac{1}{CR}}{2\cdot\left(-\frac{2}{CR}\right)+\frac{2}{CR}}\cdot\exp\left(-\dfrac{2\cdot t}{CR}\right)$

$h(t)=\dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\cdot\exp\left(-\dfrac{2\cdot t}{CR}\right)$. График переходной характеристики на рисунке 12.

Методические указания к выполнению задания 3.2.

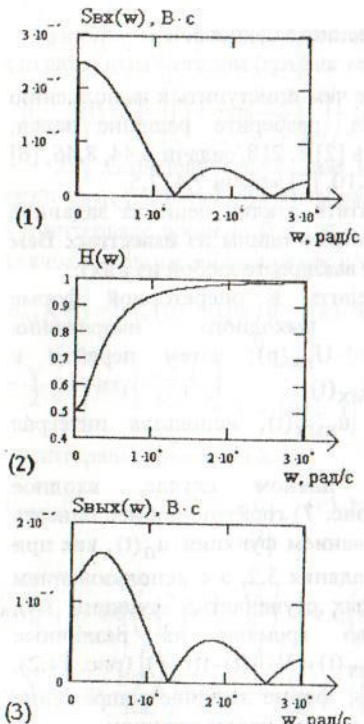


Рис. 13

1. Прежде чем приступить к выполнению этого задания, разберите решение задач, приведённых в: [2] задачи 10.1, 10.10, [7] задачи 6.1, 6.2, 6.3.

2. Входное напряжение представляет собой видеоимпульс прямоугольной формы $u_п(t)$. Комплексная спектральная плотность сигнала на входе цепи $S_{вх}(j\omega)$ равна комплексной спектральной плотности видеоимпульса прямоугольной формы.

Далее в контрольной работе следует показать вывод выражения $S_{вх}(j\omega)$, начиная с записи прямого преобразования Фурье: $S_{вх}(j\omega)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}u_п(t)\cdot e^{-j\omega\cdot t}\,dt$, и заканчивая выражением: $S_{вх}(j\omega)=V\tau\cdot\dfrac{\sin(\omega\cdot\frac{\tau}{2})}{(\omega\cdot\frac{\tau}{2})}\cdot\exp(-j\omega\cdot\frac{\tau}{2})$. Для выполнения этого задания рекомендуется изучить [6] с.17. Амплитудный спектр: $S_{вх}(\omega)=V\tau\cdot\dfrac{\left|\sin(\omega\cdot\frac{\tau}{2})\right|}{(\omega\cdot\frac{\tau}{2})}$, В·с. График представлен на рисунке 13.1.

Методические указания к выполнению задания 3.3.

Поскольку передаточная функция цепи $H(j\omega)=\dfrac{S_{вых}(j\omega)}{S_{вх}(j\omega)}$, то комплексная спектральная плотность сигнала на выходе цепи определяется

$S_{вых}(j\omega) = H(j\omega)\cdot S_{вх}(j\omega)$. Амплитудный спектр сигнала на выходе цепи $S_{вых}(\omega) = H(\omega)\cdot S_{вх}(\omega)$. Для рассматриваемой цепи (рис. 9) АЧХ передаточной функции $H(\omega)=\sqrt{\dfrac{1+(\omega\cdot CR)^2}{4+(\omega\cdot CR)^2}}$; график АЧХ изображён на рисунке 13.2. Амплитудный спектр выходного сигнала: $S_{вых}(\omega)=\sqrt{\dfrac{1+(\omega\cdot CR)^2}{4+(\omega\cdot CR)^2}}\cdot V\tau\cdot\dfrac{\left|\sin(\omega\cdot\frac{\tau}{2})\right|}{(\omega\cdot\frac{\tau}{2})}$, В·с представлен на рисунке 13.3.

Методические указания к выполнению задания 3.4.

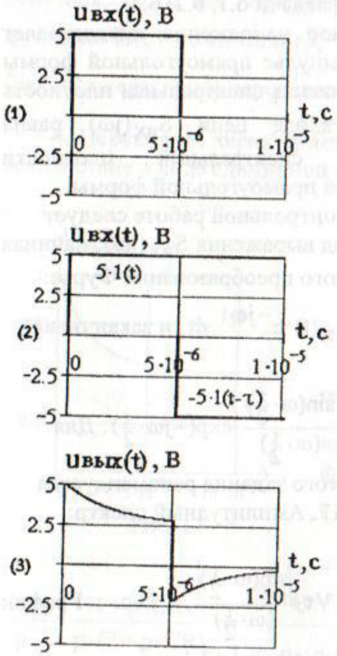


Рис. 14

1. Прежде чем приступить к выполнению этого задания, разберите решение задач, приведённых в [2] с. 218, задачи 8.44, 8.46, [6] разделы 7.9, 7.10, [7] задачи 7.4, 7.5.

2. Рассчитать отклик цепи на заданное воздействие можно одним из известных Вам способом (Вы выбираете любой из них):

- определить в операторной форме изображение выходного напряжения $U_{вых}(p) = H(p)\cdot U_{вх}(p)$; затем перейти к оригиналу $u_{вых}(t)$;
- найти $u_{вых}(t)$, используя интеграл Дюамеля.

2.1. В данном случае, входное напряжение (рис. 7) гораздо удобнее описать не с использованием функции $u_{П}(t)$, как при выполнении задания 3.2, а с использованием двух единичных ступенчатых функций 1(t), сдвинутых во времени на различные интервалы: $u_{вх}(t) = V\cdot[1(t) - 1(t-\tau)]$ (рис. 14.2). В операторной форме входное напряжение также состоит из двух составляющих:

$$U_{вх}(p) = V\cdot\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{p}\cdot e^{-p\cdot\tau}\right)=\frac{V}{p}\cdot\left(1-e^{-p\cdot\tau}\right).$$

Операторная передаточная функция была получена ранее: $H(p)=\dfrac{p+\frac{1}{CR}}{p+\frac{2}{CR}}$.

Тогда выходное напряжение в операторной форме:

$U_{вых}(p) = V\cdot\dfrac{p+\frac{1}{CR}}{p\cdot\left(p+\frac{2}{CR}\right)}\cdot\left(1-e^{-p\cdot\tau}\right)$. Определим оригинал:

- каждое из слагаемых, входящих в последний сомножитель, определяет интервал времени, на который смещается составляющая оригинала выходного напряжения, - 0, τ;
- оригинал дроби был определён ранее: $\dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\cdot\exp\left(-\dfrac{2\cdot t}{CR}\right)=\dfrac{1}{2}\cdot\left(1+\exp\left(-\dfrac{2\cdot t}{CR}\right)\right)$;
- функция мгновенных значений напряжения на выходе цепи, найденная операторным методом (график на рисунке 14.3):

$$u_{вых}(t)=\frac{V}{2}\cdot\left[\left(1+\exp\left(-\frac{2\cdot t}{CR}\right)\right)\cdot 1(t)-\left(1+\exp\left(-\frac{2\cdot(t-\tau)}{CR}\right)\right)\cdot 1(t-\tau)\right].$$

2.2. Определить функцию мгновенных значений напряжения на выходе цепи $u_{вых}(t)$, используя интеграл Дюамеля, можно следующим образом:

- в интервале времени $0 \le t \le \tau$ (не включая реакцию цепи на отрицательный скачок входного напряжения от V, В до 0, В в момент времени τ):

$$u_{вых}(t)=u_{вх}(0)\cdot h(t)+\int_0^t u'_{вх}(\varepsilon)\cdot h(t-\varepsilon)\ d\varepsilon = V\cdot\frac{1}{2}\cdot\left(1+\exp\left(\frac{-2\cdot t}{RC}\right)\right)+\int_0^t 0\cdot h(t-\varepsilon)\ d\varepsilon =$$

$$=\frac{V}{2}\cdot\left(1+\exp\left(\frac{-2\cdot t}{RC}\right)\right)\Bigg|_{t\in[0\ \ldots\ \tau]};$$

- в интервале времени $t \ge \tau$:

$$u_{вых}(t)=u_{вх}(0)\cdot h(t)+\int_0^\tau u'_{вх}(\varepsilon)\cdot h(t-\varepsilon)\ d\varepsilon+u_{вх}(\tau)\cdot h(t-\tau)+\int_\tau^t u'_{вх}(\varepsilon)\cdot h(t-\varepsilon)\ d\varepsilon =$$

$$=\frac{V}{2}\cdot\left(1+\exp\left(\frac{-2\cdot t}{RC}\right)\right)-\frac{V}{2}\cdot\left(1+\exp\left(\frac{-2\cdot(t-\tau)}{RC}\right)\right)+\int_\tau^t 0\cdot h(t-\varepsilon)\ d\varepsilon =$$

$$=\frac{V}{2}\cdot\left(\exp\left(\frac{-2\cdot t}{RC}\right)-\exp\left(\frac{-2\cdot(t-\tau)}{RC}\right)\right)\Bigg|_{t\in[\tau\ \ldots\ \infty)}.$$

График мгновенных значений выходного напряжения показан на рисунке 14.3.

Несмотря на то, что вид выражения $u_{вых}(t)$, найденного с использованием интеграла Дюамеля, отличается от вида выражения, найденного операторным методом, результаты расчётов совпадают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емуратский П.В., Лычкина Г.П.. Минкин Ю.Б. Электротехника и электроника. Учебник. Москва: ДМК Пресс, 2011.

2. Бабичев Ю.Е. Электротехника и электроника. Том 1. Электрические, электронные и магнитные цепи. Учебник. Москва: Горная книга, 2007.