

**Министерство РФ по связи и информатизации
Поволжский Государственный университет
телекоммуникаций и информатики**

Кафедра ТОРС

к.т.н., доц. Михайлов В.И.

**“Исследование переходных процессов, частотных и
временных характеристик электрических цепей”**

**Методические указания
к лабораторным работам
по 2-й части курса “Теория электрических цепей”**

Самара, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

1. РАБОТА № 2-1. Исследование переходных процессов в простой и сложной RL -цепи первого порядка.....	3
2. РАБОТА № 2-2. Исследование переходных процессов в простой и сложной RC цепи первого порядка.....	16
3. РАБОТА № 2-3. Исследование переходных процессов в RLC -цепях.....	26
4. РАБОТА 2.4. Исследование частотных и временных характеристик линейных электрических цепей.....	38

1. РАБОТА № 2-1. Исследование переходных процессов в простой и сложной RL -цепи первого порядка

1. Цель работы

Экспериментальное исследование переходных процессов в RL - цепи первого порядка при воздействии прямоугольного импульса напряжения.

2. Задание на подготовку к лабораторной работе

2.1. Изучить теорию по одному из рекомендуемых учебников и описание этой лабораторной работы.

2.2. Ответить на контрольные вопросы.

2.3. Выполнить предварительный расчёт.

2.4. Ознакомиться с назначением ручек управления и переключателей стенда ЛКТС.

2.5. Изучить работу прикладной программы Electronics Workbench (EWB).

3. Задание на предварительный расчёт

3.1. В схеме рис.1.1 рассчитать графики $u_R(t)$ и $u_L(t)$ для указанных в таблице 1.1 значений L , R , E , f . Значение t_u принять равным $1/2f$. Результаты расчёта занести в таблицу 1,3. По данным расчёта построить зависимости $u_L(t)$ и $u_R(t)$. При построении графиков масштабы по осям ординат и абсцисс целесообразно выбрать следующими: $u(t) = 3 \div 4$ см; $t_u = 2 \div 3$ см.

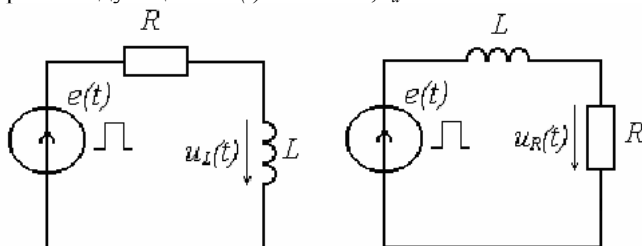


Рис.1.1. Схемы для расчёта переходных процессов $u_R(t)$ и $u_L(t)$

Таблица 1.1. Исходные данные для расчёта на ЛКТС и ЭВМ

№ бригады	L, мГн	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	F, кГц	E, В
1	30	640	1280	2560	2,5	1,5
2	35	640	1280	2560	2	1,5
3	40	1280	2560	5120	2,5	2,0
4	45	1280	2560	5120	2,5	2,0
5	50	1280	2560	5120	2,5	1,5
6	55	1280	2560	5120	2,5	2,0

7	60	1280	2560	5120	2	2,0
8	65	2560	5120	10000	2,5	1,5
9	70	2560	5120	10000	2	2,0
10	75	2560	1280	10000	2	2,0
11	50	2560	5120	10000	2	2,0
12	55	2560	5120	10000	1,5	1,5
13	57	2560	5120	10000	1,5	1,5
14	60	2560	5120	10000	2	1,5
15	65	2560	5120	10000	2	2,0

Таблица 1.2. Исходные данные для макетов.

№ Бригады	L, мГн	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	t _и мкс	F, кГц	E, В
1	67	2680	1675	160	2.0	1
2	49	2450	1400	140	2.4	2
3	51	2550	1460	140	2.4	3
4	53	2650	1515	140	2.4	1
5	55	2750	1570	140	2.4	2
6	57	2280	1425	160	2.0	3
7	59	2360	1475	160	2.0	1
8	61	2440	1525	150	2.2	2
9	63	2100	1400	180	1.8	3
10	65	2170	1440	180	1.8	1

3.2. Рассчитать постоянную времени τ_L цепи (рис. 1.1) для других значений резистора R_2 и R_3 . Результаты расчёта занести в таблицу 1.4.

3.3. Построить графики $u_{R1}(t)$ и $u_{R2L}(t)$ в схеме рис. 1.2 при прямоугольном входном напряжении для следующих значений сопротивлений: $R_1 = 1000$ Ом и $R_2 = 2560$ Ом.

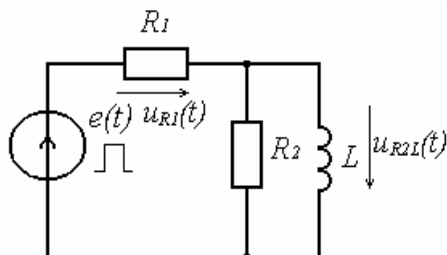


Рис. 1.2. Схема для расчёта переходных напряжений $u_{R1}(t)$ и $u_{R2L}(t)$

Таблица 1.3. Результаты расчёта переходных напряжений

$0 \leq t \leq t_u$	t	0	τ_L	$2\tau_L$	$3\tau_L$
	$t, \text{мкс}$				
	$u_R(t), \text{В}$				
	$u_L(t), \text{В}$				
$t \geq t_u$	t	t_u	$t_u + \tau_L$	$t_u + 2\tau_L$	$t_u + 3\tau_L$
	$t, \text{мкс}$				
	$u_R(t), \text{В}$				
	$u_L(t), \text{В}$				

Таблица 1.4. Результаты по расчёту и измерению постоянной времени RL - цепи

$R, \text{кОм}$	$L, \text{мГн}$	Постоянная времени $\tau_L, \text{мкс}$	
		Расчёт	Эксперимент
$R=R_1$			
$R=R_2$			

4. Пояснения к предварительному расчёту

В данном цикле лабораторных работ исследуются переходные процессы в цепях при воздействии напряжения в виде периодических прямоугольных импульсов (рис. 1.3) от генератора прямоугольных импульсов стенда ЛКЦЦ. При подаче на вход схемы прямоугольного напряжения коммутация в цепи осуществляется автоматически самими импульсами входного напряжения. Параметры цепи выбраны так, что к моменту окончания действия прямоугольного импульса t_u , то есть на интервале $0 \div t_u$ (рис. 1.3), переходный процесс практически заканчивается. Следовательно, действие одиночного прямоугольного импульса можно рассматривать как две коммутации: включение цепи на постоянное напряжение E в момент $t=0$ и выключение цепи в момент $t=t_u$. Этим коммутациям соответствуют две схемы замещения, изображённые на рис. 1.4 и 1.5.

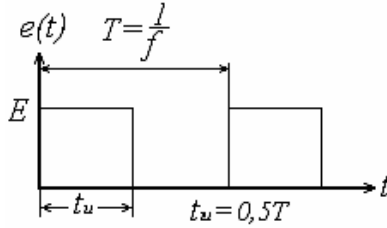


Рис. 1.3. Последовательность прямоугольных импульсов на входе цепи

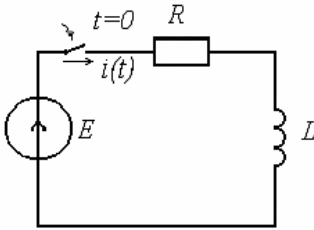


Рис. 1.4. Схема анализа при включении цепи

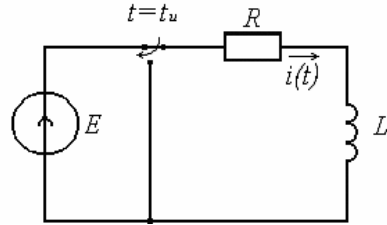


Рис. 1.5. Схема анализа при выключении цепи

Анализ переходного режима в схеме рис.1.4 даёт следующие аналитические выражения:

$$U_R(t) = iR = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad B \quad (1.1)$$

$$U_L(t) = L \frac{di}{dt} = Ee^{-\frac{t}{\tau}}, \quad B$$

а в схеме рис. 1.5:

$$U_R(t) = Ee^{-\frac{t-t_u}{\tau_L}}, \quad B \quad (1.2)$$

$$U_L(t) = -Ee^{-\frac{t-t_u}{\tau_L}}, \quad B$$

где $\tau_L = \frac{L}{R}$ – постоянная времени последовательной RL -цепи.

Для схемы рис. 1.2 можно так же рассмотреть две схемы замещения: одна на включение, другая на выключение. Для этих случаев расчётные формулы принимают следующий вид:

$$U_{R1}(t) = E(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_L}}), \quad B \quad 0 \leq t \leq t_u \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned}
 U_{R2L}(t) &= \frac{ER_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_L}}, \quad B \\
 U_{R1}(t) &= \frac{ER_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t-t_u}{\tau_L}}, \quad B \quad t \geq t_u \\
 U_{R2L}(t) &= -\frac{ER_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t-t_u}{\tau_L}}, \quad B
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

где $\tau_L = \frac{L \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2}$ – постоянная времени исследуемой сложной RL -цепи.

Указания

1. Рекомендуется приведённые соотношения (1.1), (1.2), (1.3), (1.4) вывести самостоятельно.

2. При расчёте переходных процессов в схеме рис. 1.5 удобно момент коммутации принять равным 0 ($t=0$), а затем в окончательных формулах ввести запаздывание на t_u .

Графики напряжений $u_R(t)$ и $u_L(t)$ согласно формулам (1.1) и (1.2) при подаче на вход цепи прямоугольного напряжения изображены на рис. 1.6. Графики напряжений $u_{R1}(t)$ и $u_{R2L}(t)$, согласно формулам (1.3), (1.4) при подаче на вход цепи прямоугольного напряжения изображены на рис. 1.7.

Переходный процесс после прекращения импульса обусловлен энергией, запасённой в магнитном поле катушки индуктивности за время длительности импульса. При $t > t_u$ исследуемая цепь находится в свободном режиме.

Теоретически свободный переходный процесс длится бесконечно долго. Однако практически (погрешность примерно 1%) переходный процесс заканчивается за время $t \approx (4 \div 5) \tau_L$, где τ_L – постоянная времени цепи, равная промежутку времени, за который ток (или напряжение) в свободном режиме работы цепи уменьшается в e раз ($e \approx 2,718$).

Пример расчета на ЭВМ в программе Mathcad для напряжений на резисторе и индуктивности в последовательной RL - цепи при подаче прямоугольного импульса приведен далее

$$L := 0.02 \quad \Gamma_H \quad R := 1000 \quad \Omega_M \quad E := 2 \quad B \quad \tau := \frac{L}{R} \quad f := 2000 \quad \Gamma_u$$

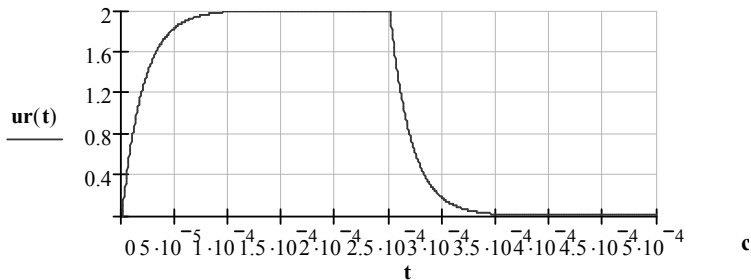
$$\tau = 2 \times 10^{-5} \quad tu := \frac{1}{2 \cdot f} \quad tu = 2.5 \times 10^{-4}$$

$$ur(t) := E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad ul(t) := E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

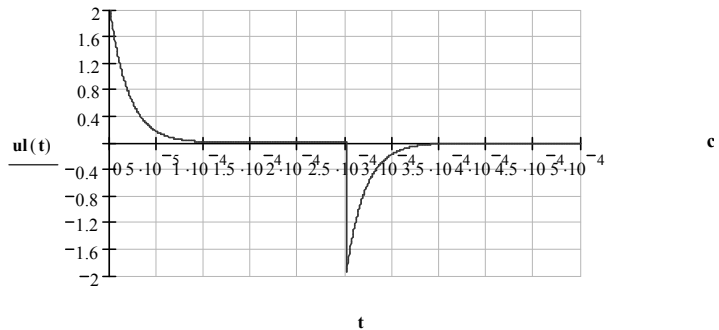
$$urb(t) := E \cdot e^{-\frac{-(t-tu)}{\tau}} \quad ulb(t) := - \left[E \cdot e^{-\frac{-(t-tu)}{\tau}} \right]$$

$$ur(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < 0 \\ ur(t) & \text{if } 0 \leq t \leq tu \\ urb(t) & \text{if } t > tu \end{cases} \quad ul(t) := \begin{cases} 0 & \text{if } t < 0 \\ ul(t) & \text{if } 0 \leq t \leq tu \\ ulb(t) & \text{if } t > tu \end{cases}$$

B



B



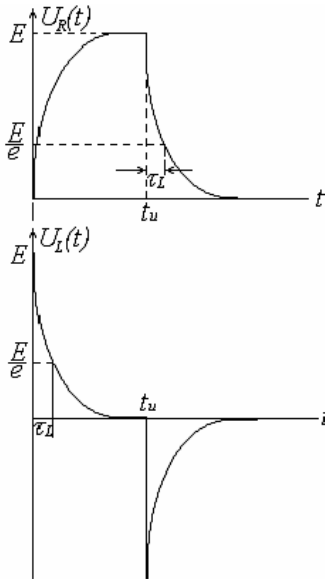


Рис. 1.6. Графики соответствующие включению и выключению RL – цепи

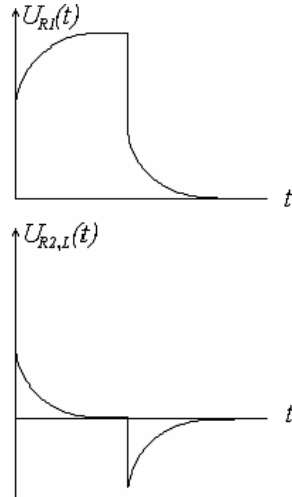



Рис. 1.7. Графики соответствующие включению и выключению сложной RL – цепи

5. Последовательность выполнения работы на стенде ЛКТС

Ознакомьтесь с лабораторным стендом ЛКТС и расположенными на нём приборами. Регуляторы на блоках стенда установить в следующие положения. На блоке питания включить тумблеры "Сеть", "Генератор", "Коммутатор-осциллограф"; на блоке Г1 тумблер "Генератор" установить в положение "Внутр."; на блоке Г2 переключатель вида сигнала в положение f_{var} "  "; регуляторы "Подстройка 1 и 2 повернуть против часовой стрелки до отказа; на блоке Г3 тумблер пределы измерения в положение 10 В, регулятор выходного напряжения в крайнее положение по часовой стрелке.

Установить переключатель выбора генератора на блоке электронного коммутатора в положение "Внутр.". Переключателем диапазонов частот и регулятором плавного изменения частоты "Плавно" на панели генератора блока Г1, а также с помощью ручек "Усил." и "Развёртка" установить устойчивое изображение прямоугольного импульса заданной частоты на экране осциллографа. Величина изображения по вертикали должна занимать размер около 2-х см и по горизонтали около 3-х см. Собрать электрическую цепь по схемам рис.1.1 и 1.2. Образец схемы приведён на рис. 1.8.

Изменяя значения сопротивления R_m в указанных пределах зарисовать на кальку осциллограммы напряжения $u_L(t)$. Во время измерений по первому каналу

лу наблюдать форму исходного импульса, а по второму — осциллограмму переходного процесса на заданном элементе. Возможно совмещение по вертикали этих осциллограмм. Определить постоянную времени τ_L цепи.

Результаты измерения занести в таблицу 3.3. Поменять местами элементы R_m и L . Изменяя значение сопротивления R_m в указанных пределах зарисовать на кальку осциллограммы $u_R(t)$. Во время измерений по первому каналу наблюдать форму исходного импульса, а по второму — осциллограмму переходного процесса на заданном элементе. Возможно совмещение по вертикали этих осциллограмм.

В схему рис.1.1 параллельно катушке индуктивности L добавить сопротивление $R = 1$ кОм, как это изображено на рис. 1.2. Зарисовать осциллограммы напряжения $u_{R2L}(t)$.

Поменять местами сопротивление R_m и катушку индуктивности L с параллельно включённым сопротивлением $R = 1$ кОм. Зарисовать осциллограммы напряжения $u_R(t)$.

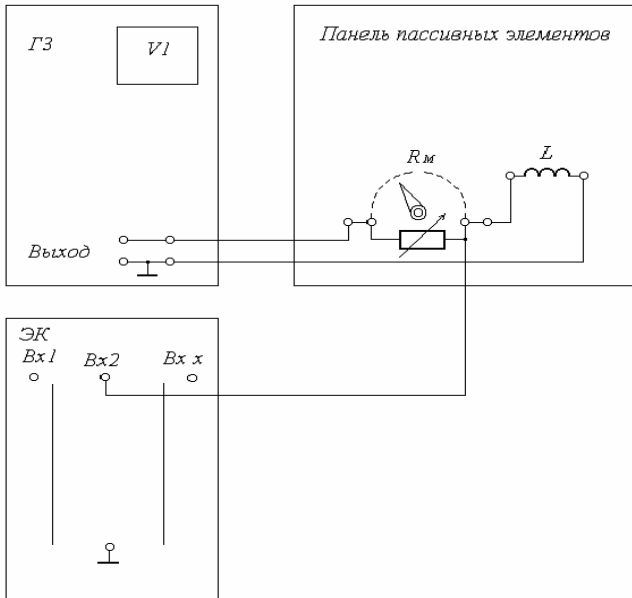


Рис. 1.8. Монтажная схема для проведения измерений

По аналогичной методике можно выполнить данную работу с использованием макетов и отдельных приборов – генераторов и осциллографов, используя детали макетов и соединительные проводники, как показано на рисунке 1.8а.

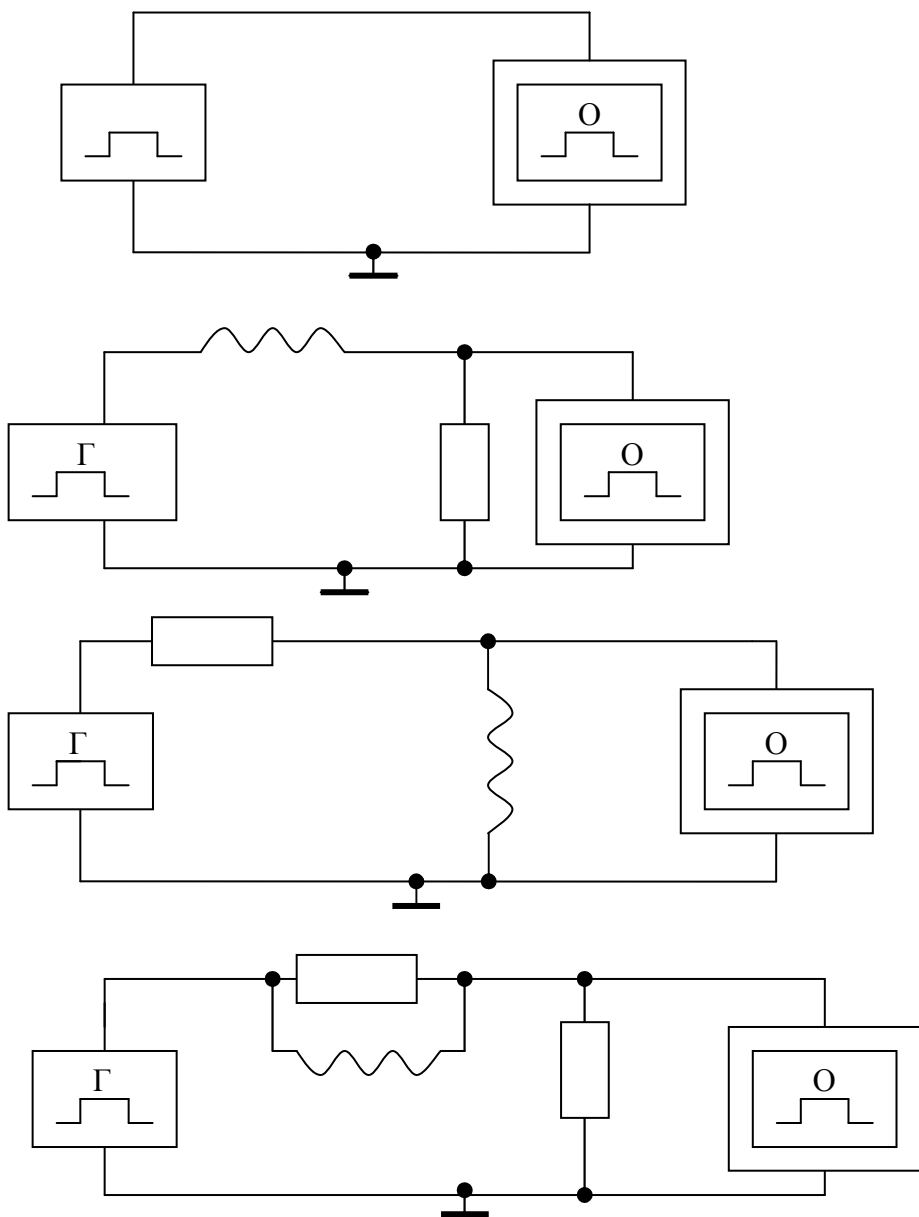


Рис.18а. Схемы исследования RL цепи на макете.

6. Последовательность выполнения работы на ЭВМ

Можно использовать программу **Electronics Workbench 4.0** или **5.0** учебной версии. В этом случае используются возможности программы, собирается модель электрической цепи по рисунку 2 с виртуальными измерительными приборами: генератором прямоугольных импульсов и осциллографом - Oscilloscope. Ниже приведены методические указания по выполнению данной работы с использованием EWB. Следует вытащить с помощью левой клавиши мыши нужные элементы и соединить их проводниками. Вид экрана по программе **Electronics Workbench 5.12** для исследования напряжения на резисторе в последовательной цепи показан ниже на рисунке 1.9. Для запуска на моделирование и получения результатов измерения необходимо нажать кнопку в верхнем правом углу экрана. Схема исследования и осциллограмма для последовательной цепи показаны далее на рис. 1.9.

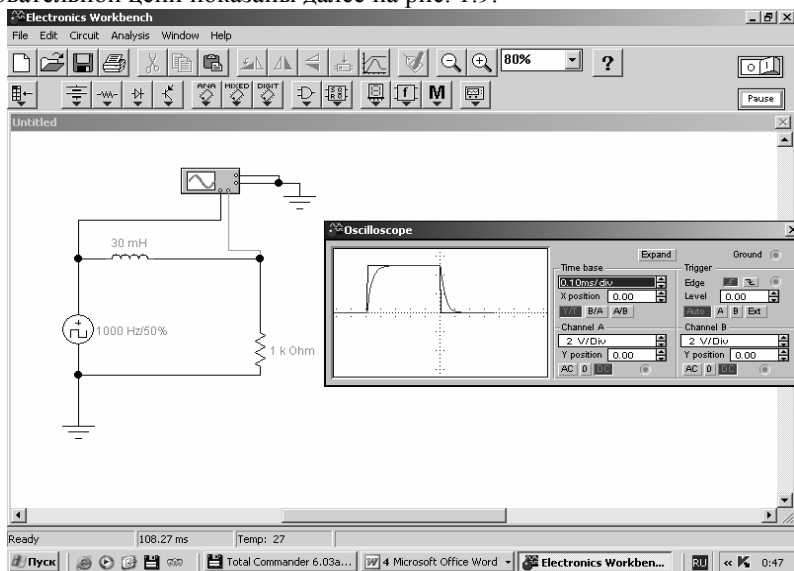


Рис.1.9. Вид экрана ЭВМ в программе **Electronics Workbench 5.12**.

Установить по своему варианту величины элементов $R=R_I$ и L , а также частоту и амплитуду генерируемых колебаний в исследуемой модели цепи. “Развернуть” осциллограф и установить “TIME BASE” (развёртку по горизонтали) 0,10 или 0,05ms/div, а масштаб по оси Y (вертикали) 2V/Div или 1V/Div - для каналов A и B, режимы Y/T, AUTO, DC, Y POS -0.00, как показано на рис. 1.10. Запустить схему на моделирование, выключить моделирование через 40 ms. Перевести осциллограф в режим **Expand**.

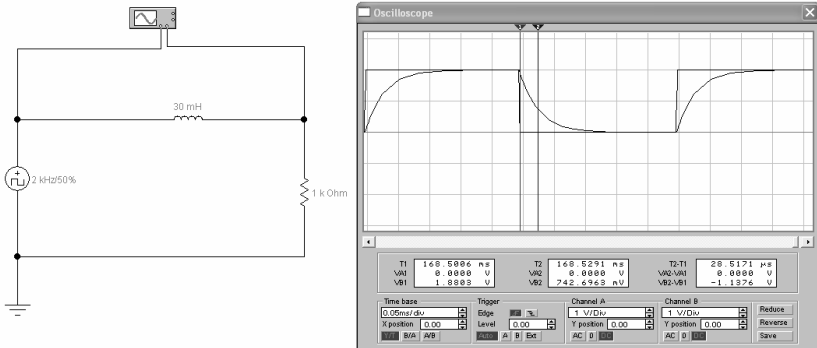


Рис. 1.10. Определение постоянной времени в LR цепи.

Зарисовать получившиеся осциллограммы $u_L(t)$ или $u_R(t)$ по каналу **B** и прямоугольного импульса по каналу **A** с указанием масштабов по каналам. Для лучшего наблюдения осциллограмм рекомендуется “расцветить” один из проводников, подключенных к осциллографу. Используя курсоры режима **Expand** (красная и синяя линии) в соответствии с рисунком 1.6 и 1.10, определить постоянную времени τ_L и записать в таблицу 1.4. Для этого установить первый курсор (красный) на конец прямоугольного импульса, затем вычислить значение напряжения E/e и установить на него синий курсор. Установить в схеме значение второго сопротивления R_2 , зарисовать осциллограммы, определить аналогично постоянную времени и записать в таблицу. Поменять местами резистор и индуктивность и снять осциллограммы переходного напряжения на индуктивности по схеме рисунка 1.11 при значениях R_1 и R_2 .

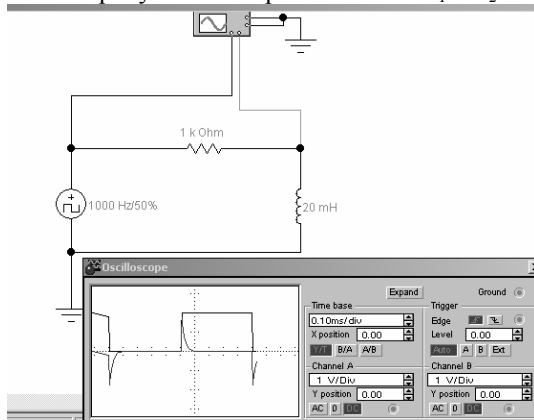


Рис. 1.11. Вид экрана ЭВМ для снятия осциллограмм на индуктивности по программе **Electronics Workbench 5.12** для последовательной RL –цепи.

Собрать сложную схему сложной цепи с двумя резисторами (рис.1.2) и произвести исследования в соответствии со схемами рисунка 1.12, не забыв определить и здесь постоянную времени, но вычислив при этом новое значение напряжения по формуле $E \frac{R_2}{R_1 + R_2}$.

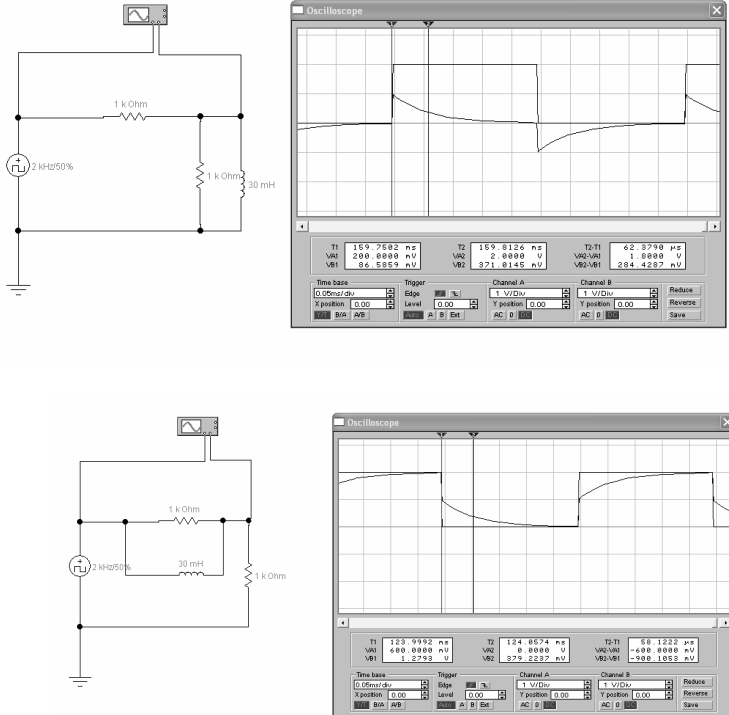


Рис. 1.12. Пример схем на ЭВМ для проведения исследований сложной цепи.

7. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) Результаты предварительного расчёта;
- 2) Таблицы предварительного расчёта;
- 3) Схемы измерений;
- 4) Все осциллограммы напряжений на элементах цепи (6 штук);
- 5) Краткие выводы об проделанной работе и исследованных цепях.

8. Контрольные вопросы

1. Чем обусловлены переходные процессы в электрических цепях?

2. Какие виды коммутации Вы знаете? Дайте определение термину "коммутация".
3. Каким образом осуществляется коммутация в данной работе?
4. Как формулируется первый закон коммутации? Как он доказывается?
5. Какой физический смысл постоянной времени τ_L ? Почему она так называется? Какие параметры определяют τ_L ?
6. Каким образом по осциллограмме переходного процесса можно определить τ_L ?
7. Зависит ли постоянная времени цепи от воздействующего на цепь напряжения?
8. Как по схеме определить начальные условия? Чем отличаются друг от друга зависимые и независимые начальные условия?
9. Чем отличаются принуждённая и свободная составляющие переходного процесса? Как они определяются?
10. Какова зависимость напряжения на резисторе от времени в последовательной RL -цепи при включении на постоянное напряжение?
11. Как влияет на $i_L(t)$ изменение R , L , E в неразветвлённой RL - цепи, включаемой на постоянное напряжение?
12. От чего зависит порядок дифференциального уравнения цепи?
13. Выведите соотношения (1.1) и (1.2).
14. Выведите соотношения (1.3) и (1.4).

9. Литература

1. Алексеев А. П. Информатика 2003, -М.: Солон-Р. 2003, с.269-329.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. -М.: Радио и связь, 2009, -592с. .
3. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. М.: Энергоатомиздат, 1989, с.234-243. Попов В. П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа. 2007. с. 306-369.
4. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Солон-Р. 2001, - 512с.
5. Киреев В.Р., Грачев С.В., Михайлов В.И., Цаплин Н.Н. Методические указания к лабораторным работам по 2-й части курса ОТЦ. ПГАТИ, каф. ТЭЦ, Самара, 2000, -104с.
6. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа. 1990 с. 212-219. Задачи №№ 8-4, 8-8, 8-18.

2. РАБОТА № 2-2. Исследование переходных процессов в простой и сложной RC цепи первого порядка

1. Цель работы

Экспериментальное исследование переходных процессов в RC- цепи первого порядка при воздействии прямоугольного импульса напряжения.

2. Задание на подготовку к лабораторной работе

2.1. Изучить теорию по одному из рекомендуемых учебников и описание этой лабораторной работы.

2.2. Ответить на контрольные вопросы.

2.3. Выполнить предварительный расчёт.

2.4. Ознакомится с назначением ручек управления и переключателей стенда ЛКТС.

2.5. Изучить работу прикладной программы Electronics Workbench (EWB).

3. Задание на предварительный расчёт

3.1. В схеме рис.2.1 рассчитать графики $u_R(t)$ и $u_C(t)$ для указанных в таблице 1 значений C, R_1, E, f . Значение t_u принять равным $1/2f$. Результаты расчёта занести в таблицу 2.

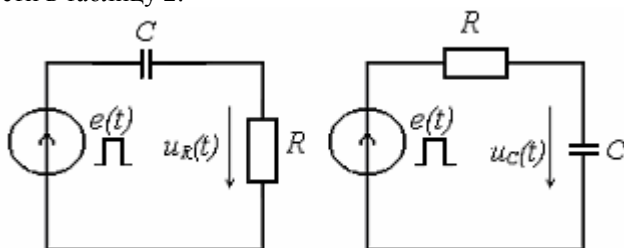


Рис.2.1. Схема для расчёта переходных процессов $u_R(t)$ и $u_C(t)$

Таблица 2.1. Исходные данные для расчёта на ЛКТС и ЭВМ

№ бригады	C, нФ	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	f, кГц	E, В
1	C _A = 23,4	10	30	0,5	1,5
2	C _A = 17,2	10	30	0,6	1,5
3	C _A = 12,92	10	30	0,7	2,0
4	C _A = 10	13	30	0,8	2,0
5	C _A = 7,92	30	100	0,5	1,5
6	C _A = 6,37	30	10	0,6	2,0

7	$C_H=200$	1	3	0,5	2,0
8	$C_F=22,92$	10	30	0,5	1,5
9	$C_B=14,91$	10	3	0,6	2,0
10	$C_F=22,92$	10	30	0,6	2,0
11	$C_A=4,18$	30	100	0,8	2,0
12	$C_A=3,48$	40	100	0,8	1,5
13	$C_B=14,91$	10	30	0,8	1,5
14	$C_H=200$	1	3	0,5	1,5
15	$C_B=14,91$	10	30	0,8	2,0

Таблица 2.2. Исходные данные для расчёта на макетах

№ бригады	C , мкФ	R_1 , кОм	R_2 , кОм	f , кГц	E , В
1	0,08	1	0,5	1,3	1
2	0,067	0,9	0,3	2	2
3	0,1	1	0,4	1	3
4	0,05	1,2	0,4	2	1
5	0,1	1,2	0,4	1	2
6	0,075	1,6	0,8	1	3
7	0,1	0,8	0,4	1,3	2
8	0,05	2	1,2	1	3
9	0,15	0,8	0,4	1	1
10	0,1	1,4	0,6	0,9	2

Таблица 2.3. Результаты расчёта переходных напряжений

$0 \leq t \leq t_u$	t	θ	τ_c	$2\tau_c$	$3\tau_c$
	t , мкс				
	$u_R(t)$, В				
	$u_c(t)$, В				
$t \geq t_u$	t	t_u	$t_u + \tau_c$	$t_u + 2\tau_c$	$t_u + 3\tau_c$
	t , мкс				
	$u_R(t)$, В				
	$u_c(t)$, В				

По данным расчёта построить зависимости $u_c(t)$ и $u_R(t)$. При построении графиков масштабы по осям ординат и абсцисс целесообразно выбрать следующими: $u(t) = 3 \div 4$ см; $t_u = 2 \div 3$ см.

Расчитать постоянную времени τ_c цепи (рис. 2.1) для значения резистора $R=R_2$. Результаты расчёта занести в таблицу 3.3.

Таблица 2.4. Результаты расчёта и измерения постоянной времени RC - цепи

R, кОм	C, нФ	Постоянная времени τ_c , мкс	
		Расчёт	Эксперимент

Рассчитать и построить графики $u_{R1}(t)$ и $u_{R2C}(t)$ в схеме рис. 2.2 при прямоугольном входном напряжении и следующих значениях сопротивлений: $R_1 = 30$ кОм, $R_2 = 10$ кОм.

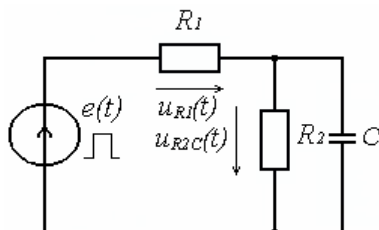


Рис. 2.2. Схема для расчёта переходных напряжений $u_{R1}(t)$ и $u_{R2C}(t)$

4. Пояснения к предварительному расчёту

В данном цикле лабораторных работ исследуются переходные процессы в цепях при воздействии напряжения в виде периодических прямоугольных импульсов (рис. 2.3) от генератора прямоугольных импульсов стенда ЛКЦЦ. При подаче на вход цепи прямоугольного напряжения коммутация в цепи осуществляется автоматически самими импульсами входного напряжения. Параметры цепи выбраны так, что к моменту окончания действия прямоугольного импульса t_u , то есть на интервале $0 \div t_u$ (рис. 2.3), переходный процесс практически заканчивается. Следовательно, действие одиночного прямоугольного импульса можно рассматривать как две коммутации: включение цепи на постоянное напряжение E в момент $t = 0$ и выключение цепи в момент $t = t_u$. Этим коммутациям соответствуют две схемы замещения, изображённые на рис. 2.4 и 2.5.

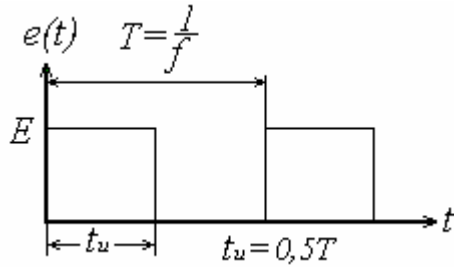


Рис. 2.3. Последовательность прямоугольных импульсов на входе цепи

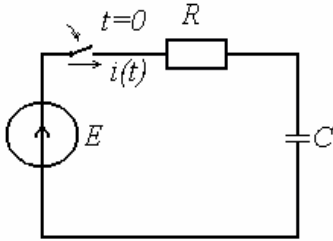


Рис. 2.4. Схема замещения при включении RC -цепи

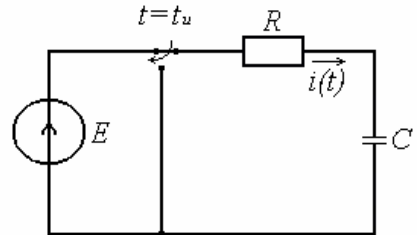


Рис. 2.5. Схема замещения при выключении RC -цепи

Анализ переходного режима в схеме рис. 2.4 даёт следующие аналитические выражения:

$$U_R(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau_c}}, \text{ в} \quad 0 \leq t \leq t_u \quad (2.1)$$

$$U_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}}), \text{ в}$$

а при выключении в схеме рис. 2.5:

$$U_R(t) = -E \cdot e^{-\frac{t-t_u}{\tau_c}}, \text{ в} \quad t \geq t_u \quad (2.2)$$

$$U_C(t) = E \cdot e^{-\frac{t-t_u}{\tau_c}}, \text{ в}$$

где $\tau_c = RC$ – постоянная времени исследуемой RC -цепи.

Для схемы рис. 2.2 можно так же рассмотреть две схемы замещения: одна на включение, другая на выключение. Для этих случаев расчётные формулы принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{R_1}(t) &= E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_c}} \right), B \\ U_{R_2, C}(t) &= \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_c}} \right), B \end{aligned} \right\} 0 \leq t \leq t_u \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{R_2C}(t) &= \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t-t_u}{\tau_C}}, B \\ U_{R_1}(t) &= -\frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t-t_u}{\tau_C}}, B \end{aligned} \right\} t \geq t_u \quad (2.4)$$

где $\tau_C = C \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ — постоянная времени исследуемой RC -цепи.

Указания

1. Рекомендуется приведённые соотношения (2.1), (2.2), (2.3), (2.4) вывести самостоятельно.

2. При расчёте переходных процессов в схеме рис. 2.5 удобно момент коммутации принять равным 0 ($t=0$), а затем в окончательных формулах ввести запаздывание на t_u .

Графики напряжений $u_R(t)$ и $u_C(t)$ согласно формулам (2.1) и (2.2) при подаче на вход цепи прямоугольного напряжения изображены на рис. 6. Графики напряжений $u_{R2C}(t)$ и $u_{R1}(t)$, согласно формулам (2.3), (2.4) при подаче на вход цепи прямоугольного напряжения изображены на рис. 2.7.

Переходный процесс после прекращения импульса обусловлен энергией, запасённой в электрическом поле конденсатора за время длительности импульса. При $t > t_u$ исследуемая цепь находится в свободном режиме.

Теоретически переходный свободный процесс длится бесконечно долго.

Однако практически (погрешность примерно 1%) переходный процесс заканчивается за время $t \approx (4 \div 5) \tau_C$, где τ_C — постоянная времени цепи, равная промежутку времени, за который ток (или напряжение) в свободном режиме работы цепи уменьшается в e раз ($e \approx 2,718$).

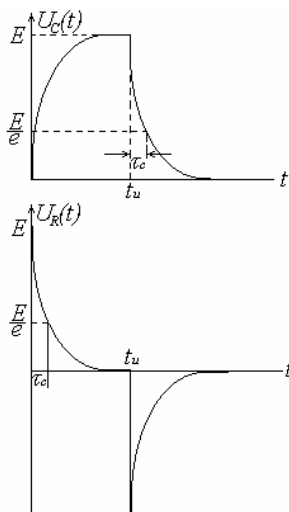


Рис. 2.6. Графики соответствующие включению и выключению RC – цепи

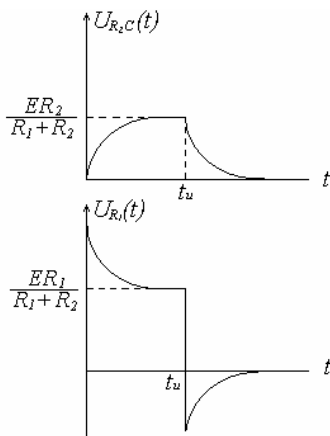



Рис. 2.7. Графики соответствующие включению и выключению сложной RC - цепи

5. Последовательность выполнения работы

Ознакомьтесь с лабораторным стендом ЛКТЦ и расположенными на нём приборами. Регуляторы на блоках стенда установить в следующие положения. На блоке питания включить тумблеры "Сеть", "Генератор", "Коммутатор-осциллограф"; на блоке Г1 тумблер "Генератор" установить в положение "Внутр."; на блоке Г2 переключатель вида сигнала в положение f_{var} "  ", регуляторы "Подстройка 1 и 2 повернуть против часовой стрелки до отказа; на блоке Г3 тумблер пределы измерения в положение 10 В, регулятор выходного напряжения в крайнее положение по часовой стрелке. Установить переключатель выбора генератора на блоке электронного коммутатора в положение "Внутр.". Переключателем диапазонов частот и регулятором плавного изменения частоты "Плавно" на панели генератора блока Г1, а также с помощью ручек "Усил." и "Развёртка" установить устойчивое изображение прямоугольного импульса заданной частоты на экране осциллографа. Величина изображения по вертикали должна занимать размер около 2-х см и по горизонтали около 3-х см. Собрать электрическую цепь по схеме рис.2.8.

Изменяя значение сопротивления R в указанных пределах зарисовать на кальку осциллограммы напряжения $u_C(t)$. Во время измерений по первому каналу наблюдать форму исходного импульса, а по второму — осциллограмму переходного процесса на заданном элементе. Возможно совмещение по верти-

кали этих осциллограмм. Определить постоянную времени цепи. Результаты измерения занести в таблицу 2.3.

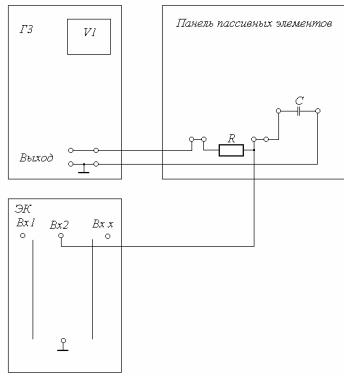


Рис. 2.8. Монтажная схема для проведения измерений

Поменять местами элементы R и C . Изменяя значение сопротивления R в указанных пределах, зарисовать на кальку осциллограммы $u_R(t)$. Во время измерений по первому каналу наблюдать форму исходного импульса, а по второму — осциллограмму переходного процесса на заданном элементе. Возможно совмещение по вертикали этих осциллограмм.

В схему рис.2.8 вместо сопротивления R подключить сопротивление $R_1=30$ кОм, а параллельно конденсатору C добавить сопротивление $R_2=10$ кОм. Зарисовать осциллограммы напряжения $u_{RC}(t)$.

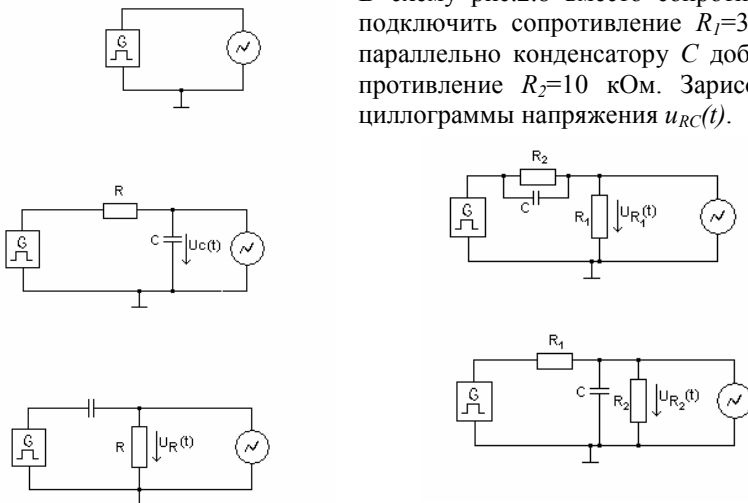


Рис.2.8а. Схемы исследования RC цепи на макетах

Поменять местами сопротивление R_1 и конденсатор C с параллельно включённым сопротивлением $R_2=30$ кОм. Зарисовать осциллограммы напряжения $u_{R2}(t)$.

По аналогичной методике можно выполнить данную работу с использованием макетов и отдельных приборов – генераторов и осциллографов, используя детали макетов и соединительные проводники по схемам рисунка 2.8а.

6. Последовательность выполнения работы на ЭВМ

Для подготовки к выполнению работы необходимо включить компьютер и запустить программу EWB. После входа в программу вызвать из памяти файл с нужной схемой либо собрать нужную схему самому, используя элементы из панели пассивных элементов. В этом случае, используя возможности программы, собирается модель электрической цепи по рис. 2.1 или 2.2. с виртуальными измерительными приборами: генератором прямоугольных импульсов и осциллографом – **Oscilloscope**, как показано на рис 2.9. Подробно работа с EWB описана в [6,7]. Ниже приведены методические указания по выполнению данной работы с использованием программы EWB.

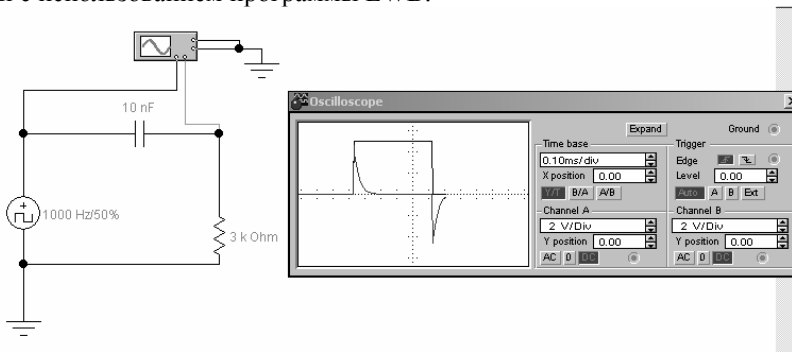


Рис.2.9. Пример схем на ЭВМ для снятия осциллограмм на резисторе.

Установить по своему варианту величины элементов $R=R_1$ и C , а также частоту и амплитуду генерируемых колебаний в исследуемой модели цепи. “Развернуть” сциллограф и установить “**TIME BASE**” (развёртку по горизонтали) и масштаб по оси **Y** (вертикали) удобные для наблюдения (0.05 или 0.1 ms/div), 500mV, 1 или 2V/Div для каналов **A** и **B**, как показано на рис. 2.9. Запустить схему на моделирование, выключить моделирование через 40 ms. Перевести осциллограф в режим **Expand** определить постоянную времени, используя курсоры режима **Expand** аналогично рисунку 2.6 и записать значение в таблицу 2.4. Зарисовать получившиеся осциллограммы $u_R(t)$ по каналу **B** и прямоугольного импульса по каналу **A** с указанием масштабов по каналам. Для лучшего наблюдения осциллограмм рекомендуется “расцветить” один из проводников, подключенных к осциллографу. Изменить значение резистора на R_2 , снова определить постоянную времени и зарисовать осциллограмм-

мы. Снять осциллограммы переходного напряжения на емкости, используя схему рисунка 2.10 при двух значениях резистора (R_1 и R_2).

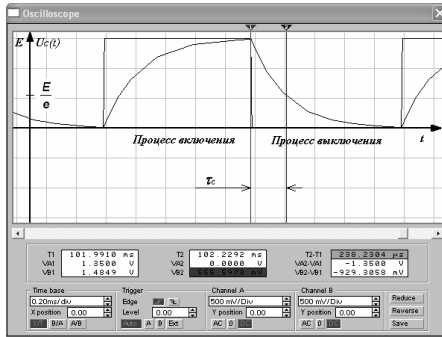


Рис. 2.10. Пример установки режимов работы осциллографа для получения осциллограмм на емкости.

Снять осциллограммы на резисторах R_1 и R_2 в сложной цепи по схеме рисунка 2.11 и определить здесь постоянную времени.

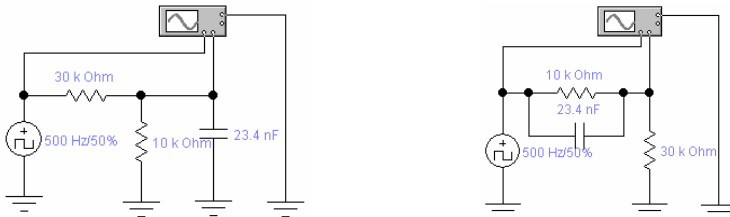


Рис.2.11. Пример исследования на ЭВМ для снятия осциллограмм в сложной цепи.

7. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- 1) Результаты предварительного расчёта;
- 2) Таблицы предварительного расчёта;
- 3) Схемы измерений;
- 4) Все осциллограммы напряжений на элементах цепи;
- 5) Краткие выводы о проделанной работе.

8. Контрольные вопросы

1. Чем обусловлены переходные процессы в RC - цепях?
2. При каком условии переходный процесс называется свободным?

3. Как формулируется второй закон коммутации? Как он доказывается?
4. Дифференциальным уравнением какого порядка можно описать переходный процесс в последовательной RC -цепи? Запишите это уравнение.
5. Какой физический смысл постоянной времени τ_C ? Почему она так называется? Какие параметры определяют τ_C ?
6. Каким образом по осциллограмме переходного процесса можно определить τ_C ?
7. Зависит ли постоянная времени цепи от воздействующего на цепь напряжения?
8. Как по схеме определить начальные условия? Чем отличаются друг от друга зависимые и независимые начальные условия?
9. Чем отличаются принуждённая и свободная составляющие переходного процесса? Как они определяются?
10. Какова зависимость напряжения на резисторе от времени в последовательной RC -цепи при включении на постоянное напряжение?
11. Как влияет на $i_C(t)$ изменение R , C , E в неразветвлённой RC -цепи, включаемой на постоянное напряжение?
12. Дайте определение термину "коммутация". Какие виды коммутации в цепи Вы знаете?
13. Выведите соотношения (2.1) и (2.2).
14. Выведите соотношения (2.3) и (2.4).

Литература

1. Алексеев А. П. Информатика 2003. М.: Солон-Р. 2003, с. 269-329.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь, 2009, -592с.
3. Дубинин А.Е., Грачев С.В., Киреев В.Р., Михайлов В.И., Цаплин Н.Н.. Методические указания к лабораторным работам по 2-й части курса ОТЦ, ПГАТИ, Самара, 2000.
4. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. М.: Энергоатомиздат, 1989, с.234-243.
5. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Солон Р. 2001, - 512с.
6. Попов В. П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа. 2007. с. 306-369.
7. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. М. : Высшая школа. 1990 с. 212-219. Задачи №№ 8-4,8-8, 8-18, 8-22.

3. РАБОТА № 2-3. Исследование переходных процессов в RLC -цепях

1. Цель работы

Экспериментальные исследования переходных процессов в последовательной и параллельной RLC -цепях при подключении источника постоянного напряжения. Работа может выполняться на универсальном стенде ЛКТС, на ЭВМ и на специальных макетах.

2. Задание на подготовку к работе

- 2.1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы, изучить теорию по рекомендуемой литературе и ответить на контрольные вопросы.
- 2.2. Выполнить предварительный расчёт.

3. Задание на предварительный расчёт

3.1. Для подключаемой под постоянное напряжение цепи схемы рисунка 3.1 рассчитать закон изменения переходной величины в соответствии с таблицей 3.1 при выполнении на стенде ЛКТС или ЭВМ и по таблице 3.2

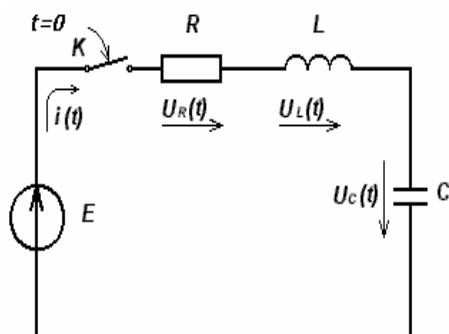


Рис. 3.1. Схема последовательной RLC -цепи

при выполнении на макетах. Дополнительные варианты N для ЭВМ можно получить из таблицы 3.1, вычислив емкость по формуле:

$$C_{(n)} = (16 + 0,1 * N) \text{ нФ.}$$

Остальные величины выбирать по последней цифре номера варианта N в таблице 3.1 (16 по 6, 17 по 7 и т.д., 20 по 10, 21 по 1 и т.д.).

3.2. Построить график рассчитанной величины.

3.3. Рассчитать величины критического сопротивления $R_{кр}$, периода свободных колебаний

$T_{св.}$, декремента затухания Δ для схемы рисунка 3.1.

3.4. Для схемы рисунка 3.2 рассчитать $R_{икр}$, построить качественно графики $u_{LC}(t)$ при $R_i < R_{икр}$ и $R_i > R_{икр}$ и вывести формулу расчета корней характеристического уравнения.

Таблица 3.1. Исходные данные для стенда ЛКТС и ЭВМ

№ бригады	$f(t)$	L, мГн	C, нФ	R, Ом	E = 2 В,
1	$u_R(t)$	30	14,9	500	
2	$u_L(t)$	35	14,9	500	

3	$u_C(t)$	40	14,9	500	f=0.5 кГц, t_и=1 мс, R₁=500 Ом.
4	$u_R(t)$	45	14,9	10000	
5	$u_L(t)$	50	14,9	10000	
6	$u_C(t)$	55	14,9	10000	
7	$u_R(t)$	60	14,9	4012	
8	$u_L(t)$	65	14,9	4177	
9	$u_C(t)$	70	14,9	4334	
10	$u_R(t)$	75	14,9	500	
11	$u_L(t)$	50	14,9	500	
12	$u_C(t)$	55	14,9	500	
13	$u_R(t)$	57	14,9	10000	
14	$u_L(t)$	60	14,9	10000	
15	$u_C(t)$	65	14,9	10000	

Таблица 3.2. Исходные данные для макетов

№	$f(t)$	L , мГ	C , нФ	R , кОм	$t_{и}$, мс	f , кГц	E , В	R_1 , Ом
1	$u_R(t)$	67	2700	1,6	300	1,1	1	1600
2	$u_L(t)$	49	2200	9,44	260	1,3	2	1600
3	$u_C(t)$	51	2700	18	280	1,2	3	1500
4	$i_R(t)$	53	3900	1,3	340	1,0	1	1300
5	$u_L(t)$	55	4300	7,15	360	0,9	1	1200
6	$u_C(t)$	57	4300	15	380	0,9	2	1300
7	$u_R(t)$	59	3900	1,3	360	1,0	3	1300
8	$u_L(t)$	61	3300	8,6	340	1,1	1	1500
9	$u_C(t)$	63	2200	20	280	1,2	2	1800
10	$i(t)$	65	2700	1,5	320	1,0	3	1500

4. Пояснения к предварительному расчёту

В данной лабораторной работе коммутация осуществляется внутри источника (генератора прямоугольных импульсов), в результате чего происходит скачкообразное изменение напряжения во времени на входе цепи. То есть как бы под действием прямоугольных импульсов напряжения, параметры которых выбраны так, что к началу следующего импульса переходный процесс от предыдущего импульса практически заканчивается. Это даёт возможность рас-

смаивать переходный процесс как реакцию на подключение источника постоянного напряжения с заданной э.д.с. E .

Переходные процессы в последовательной RLC-цепи в этом случае описываются дифференциально-интегральным уравнением вида:

$$u_{R+uL+uC}=e(t), \quad Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = E.$$

Решение этого уравнения дает

$$\text{выражение для переходного тока } i(t) = \frac{E}{L(p_1-p_2)} \cdot (e^{p_1 t} - e^{p_2 t})$$

Для расчёта нужной переходной величины следует определить корни p_1, p_2 характеристического уравнения цепи схемы рисунка 3.1 и воспользоваться нижеприведенными формулами.

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

При $R > R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$ и отрицательных различных значениях $p_{1,2}$, что соответствует аperiodическому переходному процессу, расчёты ведутся по формулам:

$$u_R(t) = \frac{ER}{L(p_1-p_2)} \cdot (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}),$$

$$u_L(t) = \frac{E}{p_1-p_2} \cdot (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t})$$

$$u_C(t) = E + \left(\frac{E}{p_1-p_2}\right) \cdot (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t})$$

При $R = R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$ и одинаковых значениях $p_1 = p_2 = p$, что соответствует критическому характеру процесса, расчёты следует вести по формулам:

$$u_R(t) = \frac{ER}{L} t \cdot e^{pt} \quad u_L(t) = E(1 + pt)e^{pt}$$

$$u_C(t) = E - E(1 - pt)e^{pt},$$

где $p = -R/2L$.

При $R < R_{кр}$ и комплексно – сопряжённых значениях корней $p_{1,2} = -b \pm j\omega_{св}$, что соответствует колебательному процессу, расчёты ведутся по формулам:

$$u_R(t) = \frac{ER}{\omega_{св} L} \cdot e^{-bt} \sin(\omega_{св} t),$$

$$u_L(t) = -\frac{E}{\omega_{CB} \sqrt{LC}} e^{-bt} \sin(\omega_{CB} t - x),$$

$$u_C(t) = E - \frac{E}{\omega_{CB} \sqrt{LC}} e^{-bt} \sin(\omega_{CB} t + x),$$

$$\text{где } b = \frac{R}{2L}, \quad \omega_{CB} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}, \quad x = \arctg \frac{\omega_{CB}}{b}.$$

Расчёты необходимо производить в интервале времени:

$$0 \leq t \leq t_u.$$

Для построения графика переходной величины надо найти начальное значение (при $t = 0$) и конечное значение переходной величины (при $t = \infty$). Примерный график переходного напряжения $u_R(t)$ для колебательного характера показан на рисунке 3.2. На графике показано, что амплитуда колебаний убывает по экспоненте, а декремент затухания Δ и период свободных колебаний можно определить из графика. Для расчёта T_{CB} и Δ применяются формулы:

$$T_{CB} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_1}{2L}\right)^2}},$$

$$\Delta = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} = e^{bT_{CB}}$$

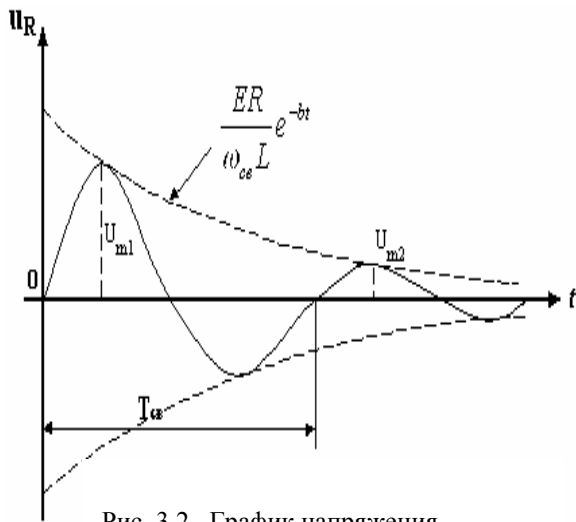


Рис. 3.2. График напряжения на резисторе при колебательном характере переходного процесса.

Колебательный переходный процесс в последовательной RLC цепи происходит при $R < R_{кр}$, а апериодический процесс при $R > R_{кр}$.

При расчетах и построениях графиков можно применять программу Mathcad. Например при данных, указанных в основных единицах системы СИ

$$L := 25 \cdot 10^{-3} \quad C := 14.9 \cdot 10^{-9} \quad R := 500 \quad E := 2$$

$$R1 := 500$$

корни получаются следующими

$$p1 := \frac{-R}{2 \cdot L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2 - \frac{1}{L \cdot C}} \quad p1 = -1 \times 10^4 + 5.084i \times 10^4$$

$$p2 := \frac{-R}{2 \cdot L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2 - \frac{1}{L \cdot C}} \quad p2 = -1 \times 10^4 - 5.084i \times 10^4$$

Напряжение на емкости можно рассчитывать по общей формуле

$$uc(t) := E + \left(\frac{E}{p1 - p2}\right) \cdot (p2 \cdot e^{p1 \cdot t} - p1 \cdot e^{p2 \cdot t})$$

По ней же можно построить и график, показанный на рис.3.2а.

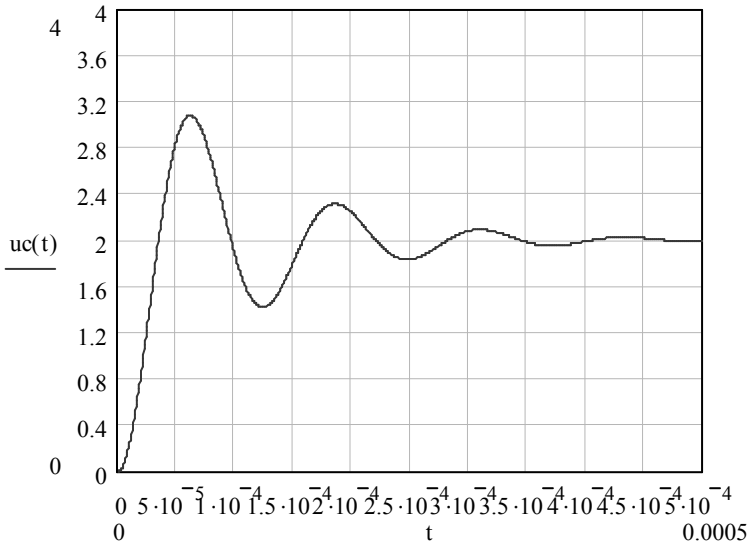


Рис. 3.2а. Пример графика напряжения на емкости.

$$R_{kr} := 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad R_{kr} = 2.591 \times 10^3$$

$$T_{sv} := \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \left(\frac{R_1}{2 \cdot L}\right)^2}} \quad T_{sv} = 1.236 \times 10^{-4}$$

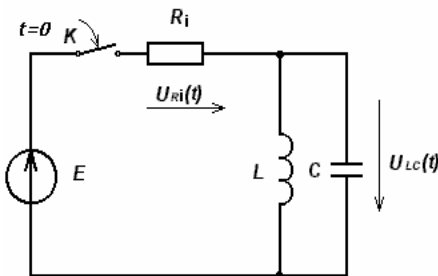
На рисунке 3.3 представлена схема параллельной LC – цепи, подключаемой к источнику постоянного напряжения через сопротивление R_i . Для расчетов процессов в этой цепи рекомендуется применить операторный метод расчета переходных процессов.

Операторное выражение для напряжения получается следующим:

$U_{LC}(p) = \frac{E(p) \cdot pL}{p^2 LCR_i + pL + R_i}$. Рекомендуется вывести эту формулу самостоятельно. Функцию времени $u(t)$ можно найти с помощью перехода от изображения к оригиналу по теореме разложения или с применением программных средств (Mathcad).

$$\text{Для этой схемы } R_{ikp} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Колебательный переходный процесс в параллельной LC – цепи происходит при $R_i > R_{ikp}$, а аperiodический процесс - при $R_i < R_{ikp}$. Для построения графика $u_{LC}(t)$ надо определить напряжения при $t = 0$ и $t = \infty$, используя законы коммутации и Кирхгофа. Примерный график $u_{LC}(t)$ в аperiodическом режиме показан на рисунке 3.4.



3.3. Схема параллельной RLC - цепи

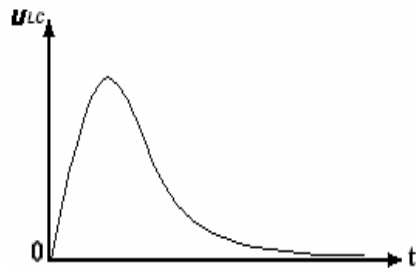


Рис. 3.4. График напряжения параллельной RLC - цепи

боте. Для этого на блоке питания включить тумблеры “сеть”, “генератор”,

“коммутатор осциллограф”. На блоке Г1 Тумблер “генератор” установить в положение “внутри”, на блоке Г2 переключатель вида сигнала в положение f_{var} – “прямоугольные импульсы”, регуляторы “подстройка 1и 2 “ повернуть против часовой стрелки до отказа, на блоке Г3 установить тумблер в положение 10В, регулятор напряжения в крайне правое положение. На блоке ЭК установить тумблер по входу 1 в положение “внутри“. На Г1 установить заданную частоту следования f , на Г3 – амплитуду импульсов E . С помощью регуляторов ЭК “усил. и разв” установить по входу 1 устойчивое изображение прямоугольного импульса в размерах 2-3 см по вертикали и горизонтали.

5.2. Собрать схему по рисунку 3.5 с индуктивностью L_A , с емкостью C_B и резистором $R=500$ ом ($R < R_{кр}$). В этом случае на вход 1 подается сигнал от генератора, а на вх. 2 – с резистора. Зарисовать осциллограммы прямоугольного импульса и $u_R(t)$. По осциллограмме $u_R(t)$ определить период свободных колебаний и декремент затухания ($T_{св}$ определяется по масштабу оси времени t , а Δ по отношению амплитуд соседних максимумов). Сравнить экспериментальные значения Δ и $T_{св}$ с рассчитанными значениями.

5.3. Установить $R > R_{кр}$ (10 кОм) и зарисовать осциллограмму $u_R(t)$ для данного случая.

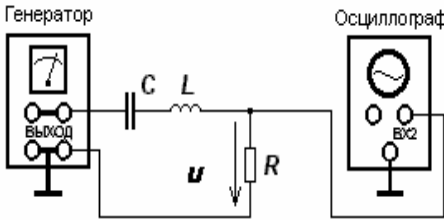


Рис. 3.5. Схема исследования последовательной цепи

ключая вход 2 осциллографа к индуктивности. Зарисовать осциллограммы напряжений на индуктивности $u_L(t)$ при сопротивлениях 500 Ом и 10000 Ом.

5.6. Собрать цепь по схеме рисунка 3.6, используя L_A и C_B и снять осциллограммы напряжения на контуре $u_{LC}(t)$

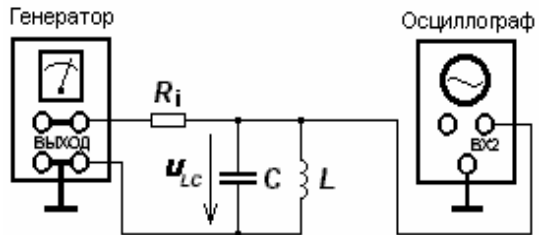


Рис. 3.6. Схема исследования параллельной цепи

5.4. Собрать электрическую цепь по схеме рисунка 3.5, поменяв местами сопротивление R с конденсатором C_B , подключив вход 2 осциллографа к конденсатору. Зарисовать осциллограммы напряжения на емкости $u_C(t)$ при $R < R_{кр}$ (500 Ом) и $R > R_{кр}$ (10 кОм).

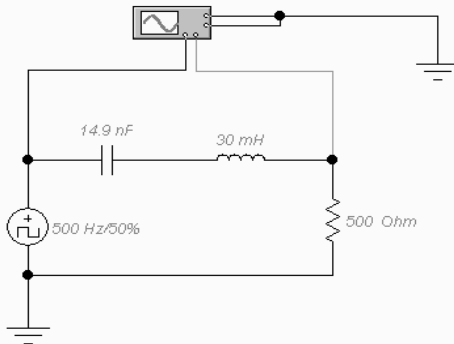
5.5. Собрать цепь по схеме рисунка 3.5, поменяв местами сопротивление R и индуктивность L , под-

при $R_i < R_{iкp}$ и $R_i > R_{iкp}$ (500 Ом и 3 кОм). Определить по ним T_{CB} и Δ .

5.7. Оценить результаты экспериментов, оформить отчет и сделать выводы.

6. Выполнение работы на ЭВМ

Выполнение по пакету программ **Electronics Workbench 5.0** (EWB). В этом случае, используя возможности программы, собирается модель электрической цепи по рисунку 3.7 с виртуальными измерительными приборами: генератором прямоугольных импульсов **-G** и осциллографом **-Oscilloscope**. Подробно работа с EWB описана в [7]. Ниже приведены методические указания по выполнению данной работы с использованием программы EWB.



6.1 Установить по своему варианту величины элементов L и C в модели цепи, частоту генератора 500 Гц, заполнение 50%, $U=2$ В, $R=500$ Ом (все указания даны для данных по стенду и ЭВМ).

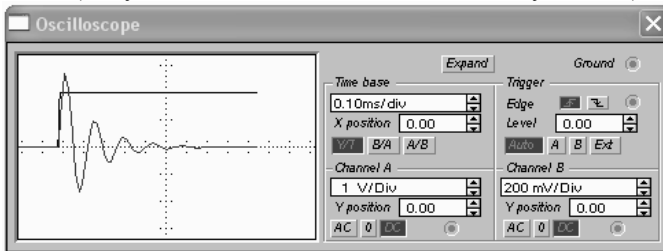


Рис. 3. 8. Внешний вид осциллографа

6.2 “Развернуть” сциллограф и установить “**TIME BASE**” (развёртку по горизонтали) $0,1ms/div$, а масштаб по оси **Y** (вертикали) $1V/Div$ - для канала **A**, и $200 mV/Div$ - для канала **B**, режимы **Y/T**, **AUTO**, **DC**, **Y POS** -1.00 , как показано на рисунке 3.8.

6.3 Запустить схему на моделирование, выключить моделирование через 40 ms. Перевести осциллограф в режим **Expand**. Зарисовать получившиеся осциллограммы $u_R(t)$ по каналу **B** и прямоугольного импульса по каналу **A** с

указанием масштабов по каналам. Для лучшего наблюдения осциллограмм рекомендуется “расцветить” один из проводников, подключенных к осциллографу. Используя курсоры режима *Expand* определить параметры переходного процесса T_{CB} и Δ (рис.3.9).

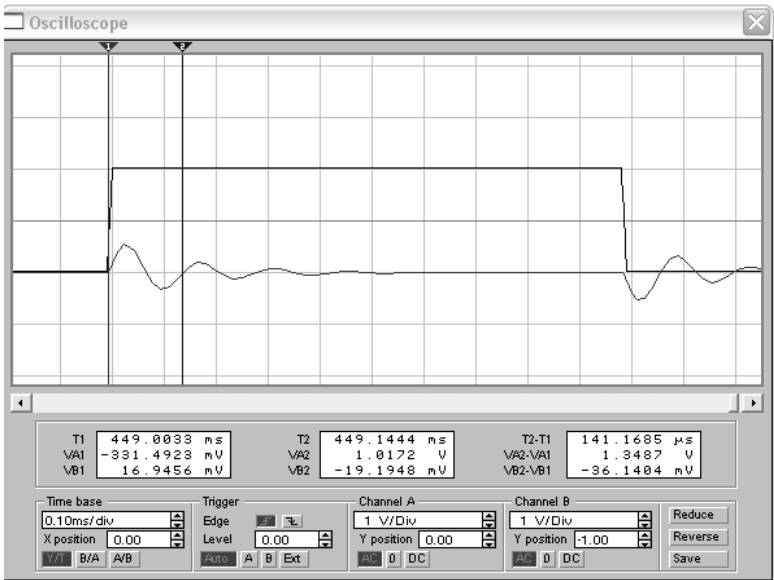


Рис.3.9. Определение периода свободных колебаний.

6.4. Установить масштаб по оси **Y** на канале **B** 1V/Div, зарисовать $u_R(t)$ в этом масштабе. Установить $R=R_{кр}$, а затем 10000 Ом и зарисовать, получающиеся осциллограммы $u_R(t)$.

6.5. Повторить “эксперимент”, поменяв в схеме рис. 3.7 R и C для получения осциллограммы u_C , R и L -для получения осциллограммы u_L при $R=500$, $R_{кр}$ и 10000 Ом. Для этого нужно отсоединить проводники от элементов, переставить элементы в нужном порядке, а затем соединить их (рис.3.10).

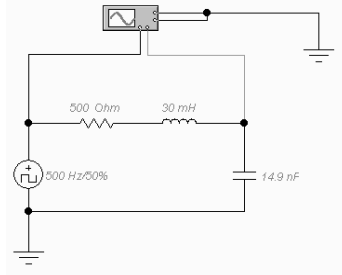


Рис.3.10. Схема для наблюдения $u_c(t)$.

6.6. Выполнить исследования по получению осциллограмм u_{LC} для параллельной LC-цепи по схеме аналогичной рис. 3.6 при $R_i = 500$, ($<R_{iKP}$) и 3000 Ом ($>R_{iKP}$) по схеме рисунка 3.11.

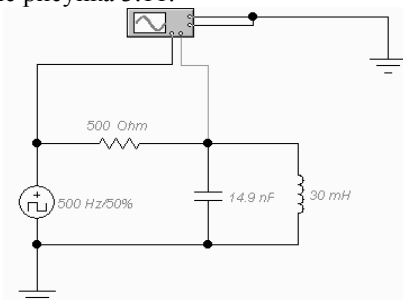


Рис. 3.11. Схема исследования параллельной LC цепи

Определить по осциллограмме и теоретически T_{CB} и Δ (для теоретического расчета необходимо определить корни характеристического уравнения параллельной цепи).

6.7. Проанализировать результаты экспериментов и сделать выводы.

7. Выполнение работы на макете

7.1. Собрать схему из элементов макета, аналогичную схеме рисунка 3.5, используя генератор прямоугольных импульсов и осциллограф, установленные для соответствующего макета.

7.2. Выставить исходные данные для генератора по варианту расчета. Следует иметь в виду, что здесь в осциллографе используется только один вход, поэтому этот вход следует подключить к генератору для получения осциллограммы входного импульса. Настроить осциллограф и зарисовать входной импульс.

7.3. Переключить вход осциллографа на резистор, для получения осциллограммы $u_R(t)$. Снять осциллограмму $u_R(t)$ при $R < R_{KP}$ ($=R_1$). Определить T_{CB} и Δ .

7.4. Снять осциллограммы $u_R(t)$ при $R =$ и $> R_{KP}$.

7.5. Снять осциллограммы $u_C(t)$ при $R <, =, > R_{KP}$, переставив C и R в схеме рис. 3.5.

7.6. Снять осциллограммы $u_L(t)$ при $R <, =, > R_{KP}$, переставив L и R в схеме рис. 3.5.

7.7. Снять осциллограммы $u_{LC}(t)$ при $R_i <, =, > R_{iKP}$, собрав схему, аналогичную рисунку 3.6. Определить по ним и T_{CB} и Δ .

7.8. Проанализировать результаты экспериментов и сделать выводы.

8. Содержание отчета

1. Результаты предварительного расчета и график, построенный по данным расчетов.
2. Схемы снятия осциллограмм и осциллограммы напряжений на элементах цепи.
3. Измеренные значения $T_{\text{СВ}}$ и Δ .
4. Выводы по результатам расчетов и эксперимента.

9. Контрольные вопросы

1. Каковы причины возникновения переходных процессов в электрических цепях?
2. Как определяются свободные составляющие в цепях второго порядка?
3. Как формулируются первый и второй законы коммутации?
4. Что подразумевают под независимыми и зависимыми начальными условиями?
5. Как записывается свободная составляющая тока в последовательной **RLC**-цепи при аperiodическом, критическом и колебательном переходном процессе?
6. Что такое частота свободных колебаний, как ее рассчитать?
7. Как влияют величины L и C на переходный процесс в последовательной **RLC**-цепи?
8. Как определить теоретически и экспериментально период свободных колебаний, декремент затухания?
9. Как получить формулу критического сопротивления в параллельной **RLC**-цепи?
10. Как определить переходные токи в индуктивности и емкости в параллельной **Ri, LC**-цепи?
11. Как влияет величина сопротивления в параллельной цепи на характер переходного процесса?

10. Литература

1. Алексеев А. П. Информатика 2003. М.: Солон-Р. 2003, 269-329.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2009, -592с.
3. Бакалов В. П., Крук Б. И., Журавлева О. Б. Теория электрических цепей. СИБГАТИ, Новосибирск, 1998, с. 112-133.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. –М.: Гардарики, 1999, с. 226-283.
5. Дубинин А.Е., Грачев С.В., Киреев В.Р., Михайлов В.И., Цаплин Н.Н. Методические указания к лабораторным работам по 2-й части курса ОТЦ, ПГАТИ, Самара, 2000.
6. Зевеке Г. В. и др., Основы теории цепей. -М.: Энергоатомиздат. 1989, с. 234 - 250.
7. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. –М.: Солон-Р, 2001. - 512с.
8. Попов В.П. Основы теории цепей. -М.: Высшая школа, 2007, с. 306-351.
9. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 212 – 272.

4. РАБОТА 2.4. Исследование частотных и временных характеристик линейных электрических цепей

1. Цель работы

Закрепить понятия комплексного коэффициента передачи, амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик, а так же переходной и импульсной характеристик. Установить связь между частотными и временными характеристиками цепи и условия неискажённой передачи сигналов. Приобрести навыки по расчёту указанных характеристик и методике их измерения.

2. Задание на подготовку к работе

- 2.1. Изучить теорию по рекомендованной ниже литературе.
- 2.2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
- 2.3. Выполнить предварительный расчёт и заготовить бланк отчёта.
- 2.4. Ознакомиться с порядком выполнения работы.

3. Задание на предварительный расчёт

3.1. Для схемы №9 из таблицы 4.1 определить коэффициент передачи по напряжению. Величины сопротивлений R_{D1} и R_{D2} выбираются из таблицы 4.2 в соответствии с номером бригады. По результатам расчётов построить график амплитудно-частотной характеристики данной схемы.

3.2. Для приведенной в таблице 4.1 схемы с одним реактивным элементом, номер которой и исходные данные выбираются из таблицы 4.2 в соответствии с номером бригады, получить выражение комплексного коэффициента передачи $H_U(j\omega)$, а также выражение амплитудно-частотной $H_U(\omega)$ и фазо-частотной $\varphi(\omega)$ характеристик.

3.3. По полученным выражениям АЧХ и ФЧХ рассчитать указанные характеристики. Расчёты выполнить на частотах, указанных в таблице 4.2, для двух значений сопротивления R : $R=R_1$ и $R=R_2$. Величины сопротивлений R_0 для тех схем, где они есть, указаны в таблице 4.2.

3.4. Рассчитать переходную характеристику заданной цепи при $R=R_1$ и построить её график в интервале $0 \leq t \leq 0,1$ мс.

3.5. Заготовить бланк отчёта, в котором привести схемы измерений, результаты предварительного расчёта, занесённые в соответствующие разделы таблиц 4.3, 4.4 и 4.5, графики рассчитанных амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик исследуемых схем, а также переходную характеристику исследуемой схемы.

Таблица 4.1. Схемы для исследования частотных и временных характеристик электрических цепей

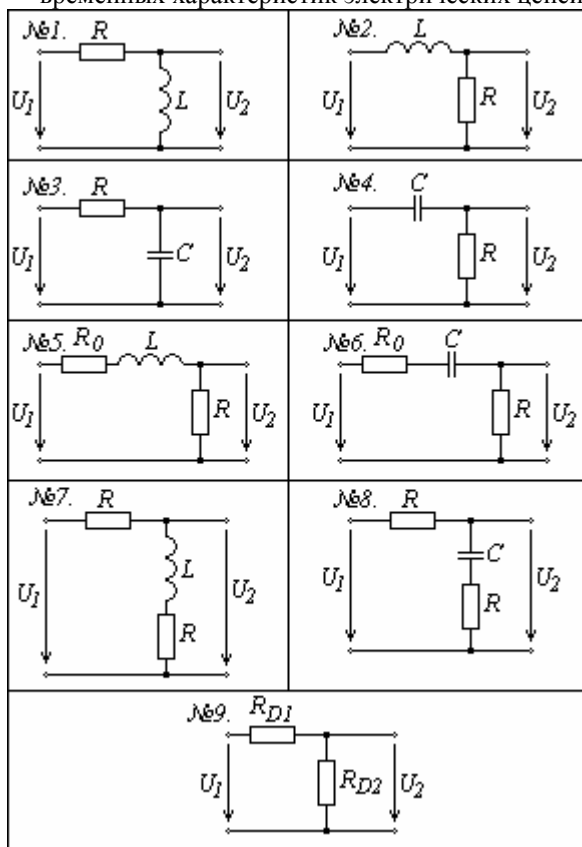


Таблица 4.2. Исходные данные для расчёта.

№ бригады	№ схемы	L, мГн	C, нФ	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	R ₀ , кОм	R _{D1} , кОм	R _{D2} , кОм	Значения частот, кГц
1	1	30		4	2,5	—	0,1	0,5	3,5,7,9,11
2	3	—	17,2	3	1,5	—	0,5	0,1	3,5,7,9,11
3	2	40		1	0,5	—	0,5	1,0	3,5,7,9,11

4	4	—	10	1	0,5	—	1,0	0,5	3,5,7,9,11
5	5	50		3	1,0	1,28	1,0	0,5	2,4,6,8,10
6	6	—	6,4	3	1,0	1,28	3,0	3,0	2,5,8,11,14
7	7	60		3	1,0	1,28	1,5	1,5	3,5,7,9,11
8	8	—	4,3	3	1,0	0,64	3,0	3,0	3,6,9,12,15
9	1	70		3	1,0	—	3,0	3,0	3,5,7,9,11
10	3	—	3,1	4	1,5	—	10	10	3,5,7,9,11
11	2	50		1	0,5	—	4	4	3,5,7,9,11
12	5	55		1,5	0,5	0,64	10	10	3,5,7,9,11
13	6	—	3,1	3	1,0	1,28	10	10	2,5,8,11,14
14	7	60		3	1,0	0,64	30	30	2,5,8,11,14
15	8	—	2,3	3	1,0	0,32	0,1	0,1	3,6,9,12,15

4. Пояснения к предварительному расчёту

Комплексным коэффициентом передачи цепи называется отношение спектральной плотности отклика к спектральной плотности воздействия:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}. \quad (4.1)$$

где $X(j\omega)$ и $Y(j\omega)$ – спектральные плотности, соответственно, воздействия и отклика.

В качестве воздействия и отклика в линейной электрической цепи могут рассматриваться либо напряжение, либо ток. При этом индекс "1" принято присваивать воздействию, а индекс "2" – отклику.

На основании выше сказанного в соответствии с выражением (1) можно получить четыре вида комплексного коэффициента передачи:

$$H_U(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} \quad \text{по напряжению;}$$

$$H_I(j\omega) = \frac{I_2(j\omega)}{I_1(j\omega)} \quad \text{по току}$$

$$H_Z(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{I_1(j\omega)} \quad \text{по сопротивлению;}$$

$$H_Y(j\omega) = \frac{I_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} \quad \text{по проводимости;}$$

Комплексный коэффициент передачи, как величина комплексная, может быть представлен в показательной форме записи:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| e^{arg H(j\omega)} = H(\omega) e^{j\varphi(\omega)}, \quad (4.2)$$

где $|H(j\omega)| = H(\omega)$ - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) цепи;

$arg H(j\omega) = \varphi(\omega)$ - фазо-частотная характеристика (ФЧХ) цепи.

Следует рассчитать коэффициент передачи по напряжению для резистивного делителя по схеме 9, получив его формулу и записать результат в таблицу 4.3.

Таблица 4.3. Результаты расчетов и измерений резистивного делителя

Параметры цепи	Частоты (кГц)					
	$H(f)$					
$R_{D1} =$	Расчётные данные					
$R_{D2} =$	Измерен. данные					

При расчетах и построениях графиков для цепей с реактивными элементами можно применять программу Mathcad. Например, при данных, указанных в основных единицах системы СИ

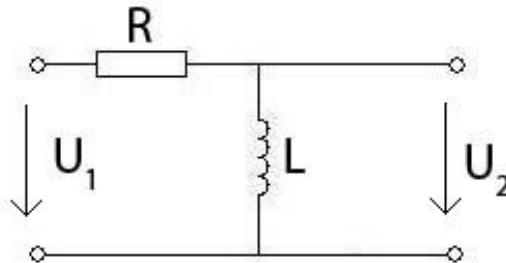


Рис. 4.1. Пример №1 схемы цепи для расчетов частотных характеристик

Так же комплексный коэффициент передачи можно получить из операторного, заменой p на $j\omega$. Уравнения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик (АЧХ и ФЧХ) этой функции представляют собой выражение

модуля и аргумента комплекса $H(j\omega)$ уравнение АЧХ. Комплексный коэффициент передачи может быть найден как отношение комплексных значений отклика и воздействия. С учётом этого определим для схемы рис.4.1 комплексный коэффициент передачи по напряжению. Для этого необходимо комплексное значение отклика выразить через комплексное значение воздействия. Нетрудно видеть, что $\underline{U}_2 = \underline{I} \cdot j\omega L$, а $\underline{I} = \underline{U}_1 / (R + j\omega L)$. Тогда

применив методику расчета комплексного коэффициента передачи к схеме рис. 4.1, получим

$$H(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{j\omega L}{R + j\omega L} = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} e^{j(\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega L}{R})}$$

и выражение для АЧХ

$$|H(j\omega)| = H(\omega) = \frac{\sqrt{\omega^2 L^2}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

и уравнение ФЧХ:

$$\psi(\omega) = \arctg\left(\frac{\omega L}{0}\right) - \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right) = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

Для практического применения график следует вычислять и строить по циклической частоте f ($\omega=2\pi \cdot f$). Теоретический график АЧХ построенный по формуле при $L=30$ мГн и $R=4$ кОм показан на рис. 4.2. Данные расчетов занести в таблицу 4.4 и 4.5.

$$H(f) = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0.03}{\sqrt{4000^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0.03)^2}}$$

На рис. 4.3 приведен график ФЧХ (в градусах), построенный по выражению

$$\psi(f) = 90 - \frac{180}{\pi} \cdot \arctg\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 0.03}{4000}\right)$$

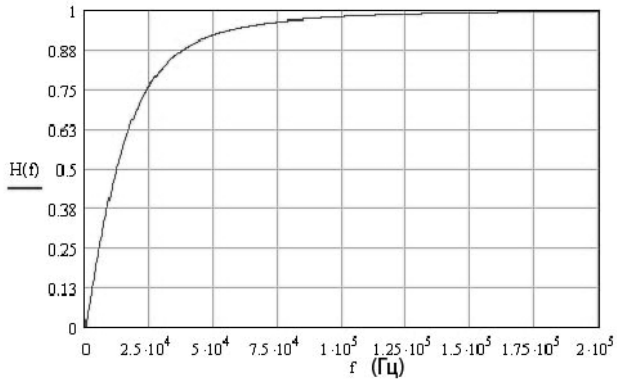


Рис. 4.2. Расчетный график АЧХ для цепи по схеме рис.4.1.

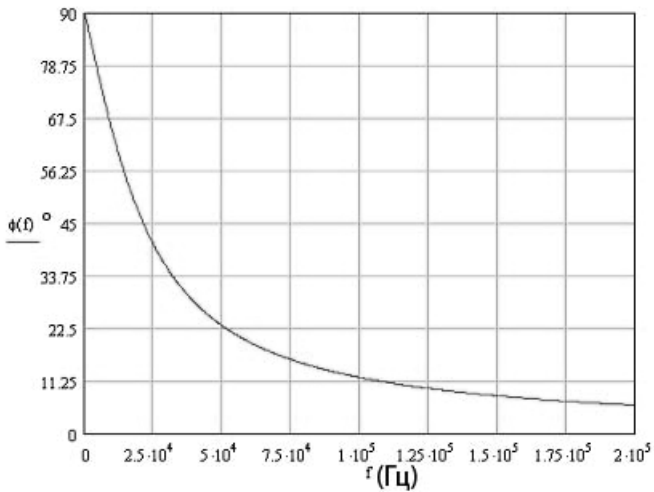


Рис.4.3. Расчетный график ФЧХ схемы рис.4.1.

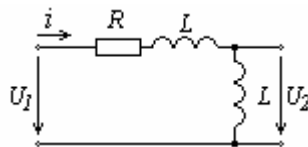


Рис. 4.4. Пример №2 схемы цепи для определения коэффициента передачи

Для схемы рисунка 4.4 выражения АЧХ и ФЧХ имеют следующий вид:

$$H_U(\omega) = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (2\omega L)^2}}; \quad \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2\omega L}{R}$$

Их также надо выразить через f . Данные расчетов занести в таблицу 4.3.

В технике связи большое значение имеет вопрос передачи сигналов через электрическую цепь без искажений. Передача электрического сигнала считается неискажённой, если форма отклика подобна форме воздействия. В этом случае отклик может отличаться от воздействия по амплитуде в K раз и при наличии в схеме накопителей электромагнитной энергии (индуктивности или ёмкости) запаздывать по времени на величину t_s (рис 3).

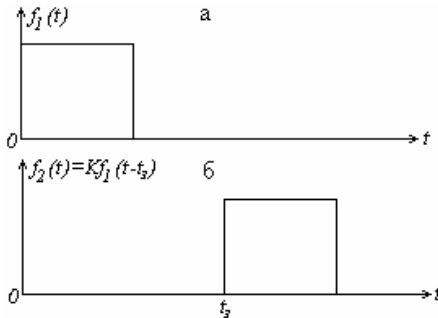


Рис. 4.5. Форма воздействия (а) и отклика (б) при передаче электрического сигнала без искажений

Цепь не вносит искажений, если её амплитудно-частотная характеристика не зависит от частоты, а фазо-частотная характеристика изменяется по линейному закону в диапазоне частот от $\omega = 0$ до $\omega = \infty$. Однако, учитывая то, что электрические сигналы обладают вполне определённой шириной спектра, достаточно выполнить эти два условия, которые называются условиями неискажённой передачи сигналов, в диапазоне частот, соответствующем ширине спектра передаваемого сигнала. Так как условий неискажённой передачи сигналов два, то искажения делятся на амплитудно-частотные и фазо-частотные.

Если АЧХ цепи зависит от частоты, то изменяются соотношения между амплитудами спектральных составляющих отклика по сравнению с их соотношениями у воздействия. Это приводит к амплитудно-частотным искажениям.

Если закон изменения ФЧХ цепи отличается от линейного, то время запаздывания для различных гармонических составляющих отклика будет разным, что приводит к фазо-частотным искажениям. Из графиков рис.4.2 и 3 следует, что цепь рис.4.1 вносит как амплитудно-частотные, так и фазо-частотные искажения, так как АЧХ и ФЧХ этой цепи не удовлетворяют условиям неискажённой

ной передачи сигналов. Примером цепи, не вносящей искажений, является цепь №9 из таблицы 4.1. По виду амплитудно-частотной характеристики цепи, если она не удовлетворяет условию неискажённой передачи, можно определить, как изменится форма отклика по сравнению с формой воздействия. Если $H(\omega)$ с ростом частоты уменьшается, то амплитуды высокочастотных составляющих сигнала уменьшаются в большей степени, чем амплитуды низкочастотных составляющих, и в этом случае в наибольшей степени искажаются участки сигнала с большой крутизной. Если же с ростом частоты $H(\omega)$ растёт, то в большей степени ослабляются амплитуды низкочастотных составляющих спектра сигнала и в этом случае в наибольшей степени искажаются участки сигнала с малой крутизной. Так, например, если в качестве воздействия взять прямоугольный импульс, то в первом случае наибольшим изменениям будут подвержены фронты импульса, а во втором случае его вершина.

Теоретически более точно о форме сигнала на выходе можно судить по временным характеристикам цепи, например, по переходной характеристике $h(t)$. Переходной характеристикой называется функция времени, численно равная реакции линейной цепи на единичное ступенчатое воздействие. Она определяется при нулевых независимых начальных условиях и её можно рассчитать по соотношению:

$$h(t) = \frac{H(p)}{p}, \text{ где } H(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} \text{ — операторный коэффициент}$$

передачи цепи, p — комплексная переменная операторного метода расчёта переходных процессов, а переходная характеристика $h(t)$ — оригинал, определяемый по обратному преобразованию Лапласа. С её использованием на основании интеграла Дюамеля реакция на выходе цепи $y(t)$ при воздействии в виде прямоугольного импульса определяется выражением:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ U_u \cdot h(t), & 0 \leq t \leq t_u; \\ U_u \cdot h(t) - U_u \cdot h(t - t_u), & t \geq t_u. \end{cases}$$

Здесь U_u — амплитуда импульса, t_u — его длительность. Следует построить графики переходной характеристики и реакции на прямоугольный импульс.

5. Последовательность выполнения работы

Данная лабораторная работа может выполняться на универсальном стенде ЛКЦ и на компьютере с применением программы электронного моделирования Electronics Workbench. Рассмотрим по отдельности выполнение работы на стенде ЛКЦ и на компьютере.

6. Выполнение работы на стенде ЛКТС

При выполнении работы на стенде ЛКТС необходимо включить стенд, а так же все его блоки и убедиться в их работоспособности по горению индикаторных лампочек на блоках: генератора, вольтметра и фазометра.

1. Измерение амплитудно-частотных характеристик.

При измерении амплитудно-частотной характеристики цепи используются следующие приборы: генератор гармонических колебаний и вольтметр. Собрать схему рис. 4.6, которая соответствует схеме №9 из таблицы 4.1. Значения параметров элементов взять из таблицы 4.2.

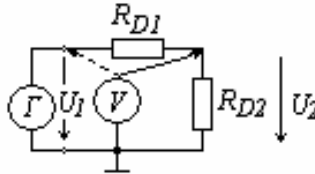


Рис. 4.6. Схема измерения амплитудно-частотной характеристики резистивного делителя

Переключатель диапазонов частот на генераторе установить в положение $2 \div 20$ кГц, а регулятором изменения частоты "ПЛАВНО" установить по частотомеру первую из частот на которых следует проводить измерения АЧХ.

Контролируя вольтметром V выходное напряжение генератора U_1 и поддерживая его с помощью регулятора выходного напряжения на плате ГЗ равным 1В, измерить напряжение U_2 на сопротивлении R_{D2} . При этом условия показания вольтметра будут численно равны АЧХ цепи $H(\omega)$. Измерения АЧХ произвести на частотах, указанных в таблице 4.2, а результаты измерений ФЧХ занести в таблицу 4.3. По измеренным данным построить амплитудно-частотную характеристику исследуемой цепи. Характеристику строить на том же рисунке, где приведена рассчитанная характеристика.

Для измерения АЧХ цепи с реактивным элементом, заданной в таблице 4.1, собрать схему, аналогичную схеме рис. 4.7. При сборке схемы в качестве резистора R_0 (если он есть в схеме) использовать магазин сопротивлений R_M , расположенный на плате пассивных элементов стенда.

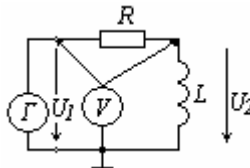


Рис. 4.7. Схема измерения АЧХ цепи с реактивным элементом

Выполнить аналогичные измерения $H(f)$ на тех же частотах при двух значениях сопротивления R : $R = R_1$ и $R = R_2$. Результаты занести в таблицу 4.4. По измеренным данным построить амплитудно-частотные характеристики исследуемой цепи на том же графике, на котором построены расчётные характеристики.

2. Измерение фазо-частотных характеристик.

Для измерения фазо-частотной характеристики необходимо собрать схему аналогичную схеме рис. 4.8 с использованием схемы варианта заданного в таблице 4.1.

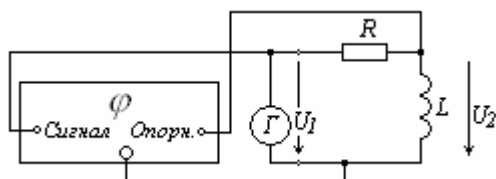


Рис. 4.8. Пример схемы измерения ФЧХ цепи с реактивным элементом

Измерить фазо-частотную характеристику исследуемой цепи при значениях сопротивления $R = R_1$ и $R = R_2$ на тех же частотах, на которых измерялась амплитудно-частотная характеристика. Результаты измерений занести в табл. 4.5. Сделать выводы о проделанных измерениях.

3. Экспериментальное исследование формы сигнала на входе и выходе цепей вносящих и не вносящих искажений.

Дать заключение о том, искажает ли данная цепь передаваемые через неё сигналы или нет, можно как по виду амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик, так и сравнив форму сигнала на входе и выходе цепи. В качестве передаваемого сигнала воспользуемся последовательностью прямоугольных импульсов. Наблюдение входного и выходного сигналов осуществляется с помощью двухлучевого осциллографа, встроеного в стенд ЛКТС.

Подготовить стенд к работе. Собрать схему рис. 4.6, используя в качестве R_{D1} и R_{D2} значения резисторов из табл. 1. Переключатель диапазонов частот на плате Г1 генератора установить в положение "0,2 ÷ 2 кГц", а регулятором плавно установить на шкале частотомера значение частоты в пределах $1 \div 1,4$ кГц. При установке тумблера "КАНАЛЫ" в положение "1" на экране осциллографа можно наблюдать входной сигнал, представляющий собой последовательность прямоугольных импульсов. Регуляторами "РАЗВЁРТКА" и "УСИЛ." установить на экране один импульс, размах которого по вертикали составлял бы 2-3 клетки, а по горизонтали — 3-4 клетки.

Тумблер “КАНАЛЫ” установить в среднее положение. В этом случае на экране осциллографа вместе с входным сигналом будет наблюдаться и выходной сигнал. Регулятором “РАСХОЖДЕНИЕ” добиться, чтобы входной сигнал располагался в верхней части электронно-лучевой трубки, а выходной — в нижней части электронно-лучевой трубки. Зарисовать оба сигнала, обратив внимание на то, что их форма одинакова.

Провести аналогичные исследования для цепи с реактивными элементами из таблицы 4.1. Для схем, в которых реактивный элемент включён в продольной ветви, установить $R=R_1$, а для схем в которых он включён в поперечной ветви — $R=R_2$. При этом сначала исследовать процесс при большой длительности импульса ($f = 0,2 \div 0,5$ кГц), получив отклик близкий к переходной характеристике, затем при $f \geq 1$ кГц, получив отклик на короткий импульс. Зарисовать форму сигнала на входе и выходе данной цепи, обратив внимание на то, что они различны.

7. Выполнение работы на ЭВМ

Для подготовки к выполнению работы необходимо включить компьютер и запустить указанную программу **Electronics Workbench 5.12**. После входа в программу вызвать из памяти файл с нужной схемой либо собрать нужную схему по рисунку 4.9 самому, используя элементы из панели пассивных элементов. Установить значения элементов схемы в соответствии с заданием таблицы 4.1.

1. Измерение амплитудно-частотных характеристик.

На генераторе установить режим гармонических колебаний, выбрать первую из частот указанных в таблице 4.2.

Установить величину выходного напряжения генератора равной 1В. Изменяя частоту генератора в соответствии с данными таблицы 4.2 наблюдать на осциллографе осциллограммы входного и выходного напряжений, а на измерителе частотных характеристик наблюдать амплитудно-частотную характеристику исследуемой цепи. Числовые значения амплитудно-частотной характеристики можно получить, измеряя значение выходного напряжения по осциллографу или подключив на выход схемы милливольтметр. Также можно раскрыть Bode Ploter и настроить его, как показано на рисунке 4.9. Занести данные измерений в таблицу 4.3.

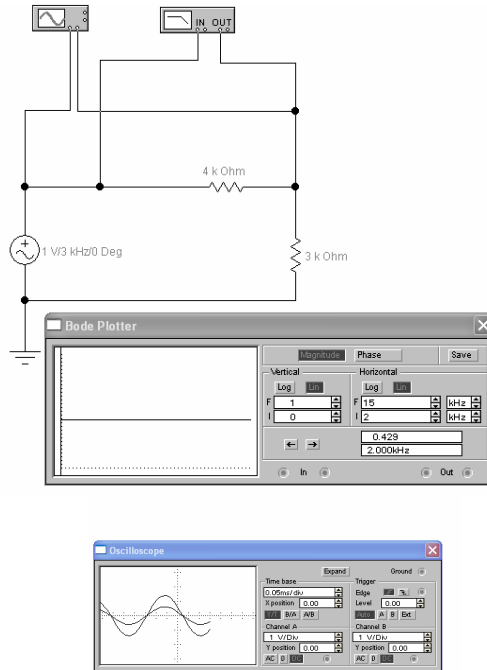


Рис. 4.9. Схема измерения и вид приборов для исследования резистивного делителя

Подключить в схеме рисунка 4.9 вместо генератора гармонических колебаний генератор прямоугольных колебаний. Наблюдать за изменением формы выходного сигнала на осциллографе (рис.4.10) и зарисовать сигналы для первой и последней частот. Сделать выводы об изменении выходного сигнала в связи с формой амплитудно-частотной характеристики цепи.

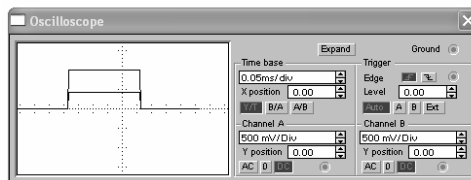


Рис.4.10. Вид прямоугольных импульсов в резистивной цепи.

Для измерения АЧХ цепи с реактивным элементом, заданной в таблице 4.1, собрать схему, аналогичную схеме рис. 4.11. Установить значения элементов

схемы в соответствии с номером бригады из таблицы 4.2. Установить на генераторе первую из частот указанных в таблице 4.2 и напряжение 1В.

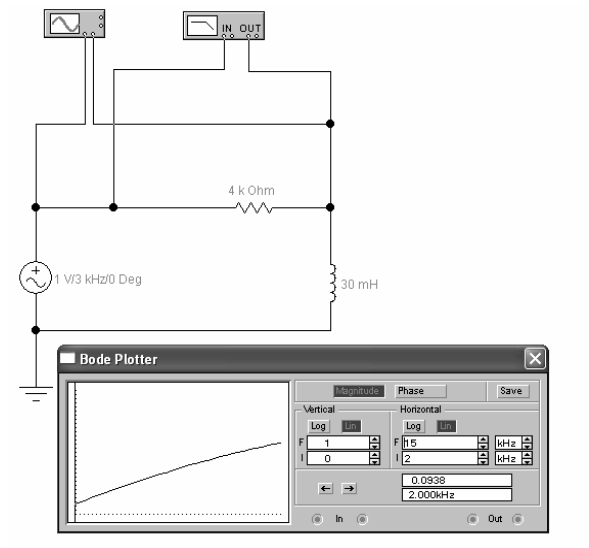


Рис. 4.11. Схема измерения АЧХ и ФЧХ цепи с реактивным элементом

Раскрыть Bode Ploter (измеритель частотных характеристик) и настроить на измерение АЧХ. Для этого установить данные по рисунку 4.11, установив нижнюю частоту как у генератора. Зарисовать график АЧХ. Численные значения измеряемой характеристики можно получить путём перемещения визира на измерителе частотных характеристик и считывая в соответствующих окошках значение частоты и значение АЧХ или нажав кнопку SAVE и прочитав получившийся при этом файл с помощью программы Word. Изменяя частоту генератора и Bode Plotera в соответствии с данными таблицы 4.2, наблюдать по осциллографу за изменением входного сигнала (рис.4.12), а по измерителю частотных характеристик за АЧХ исследуемой цепи. Результаты измерений АЧХ занести в таблицу 4.4. Зарисовать осциллограммы на первой и последней частоте. Убедиться в том, что на гармоническом сигнале невозможно заметить амплитудно-частотные искажения сигнала.

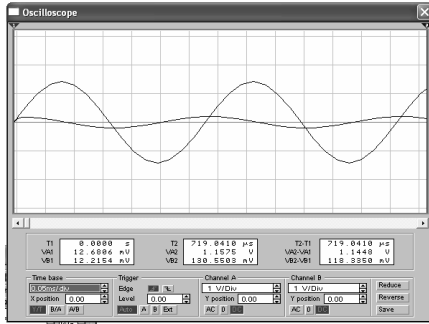


Рис.4.12. Осциллограммы входного (канал А) и выходного (канал В) сигналов.

Таблица 4.4. Результаты предварительного расчёта и экспериментальных измерений АЧХ цепи с реактивным элементом.

Данные цепи	Частота (кГц) $H(f)$					
L = или C= R= R ₁ =	Расчётные данные					
	Измеренные данные					
L= или C= R =R ₂ =	Расчётные данные					
	Измеренные данные					

2. Измерение фазо-частотных характеристик.

В схеме рисунка 4.11 на измерителе частотных характеристик установить переключатель (утопив кнопку) вида характеристики в положение **PHASE** и настроить прибор по рисунку 4.12. Наблюдать за фазочастотной характеристикой по измерителю частотных характеристик. Результаты измерений занести в таблицу 4.5.

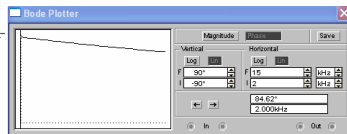


Рис.4.12. Вид ФЧХ исследуемой в примере 1 цепи.

Таблица 4.5. Результаты предварительного расчёта и экспериментальных измерений ФЧХ цепи с реактивным элементом.

Данные цепи	Частота (кГц)					
	$\varphi(f)$					
L = или C = R = R ₁ =	Расчётные данные					
	Измеренные данные					
L = или C = R = R ₂ =	Расчётные данные					
	Измеренные данные					

Численное значение сдвига фаз можно определить путём перемещения визира на измерителе частотных характеристик и считывая в соответствующих окошках значение частоты и значение фазы.

Изменить значение сопротивления на R_2 в соответствии с таблицей 4.2 и проделать те же измерения что и ранее. Зарисовать наблюдаемую АЧХ и ФЧХ цепи. Сделать выводы о проделанных измерениях.

3. Экспериментальное исследование формы сигнала на входе и выходе цепей, вносящих и не вносящих искажений.

Дать заключение о том, искажает ли данная цепь передаваемые через неё сигналы или нет, можно как по виду амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик, так и сравнив форму сигнала на входе и выходе цепи. Для наблюдения формы сигнала воспользуемся осциллографом, который позволяет одновременно наблюдать форму сигнала на входе и выходе цепи. В качестве передаваемого сигнала возьмём периодический прямоугольный сигнал.

Собрать схему аналогичную рис. 4.11с подключением генератора прямоугольных импульсов. Частоту генератора вначале установить малую частоту $f = 500$ Гц ($t_{и}$ большое) и получить реакцию близкую к переходной характеристике, затем большую $f = 2$ кГц ($t_{и}$ малое) и исследовать искажения импульса. После этого установить $f = 10$ кГц и также исследовать импульс на выходе. Установив на осциллографе нужное значение частоты развертки, наблюдать на экране осциллографа входной и выходной сигналы. Зарисовать получившиеся сигналы. Пример наблюдения входного и выходного сигналов представлен на рис. 4.14.

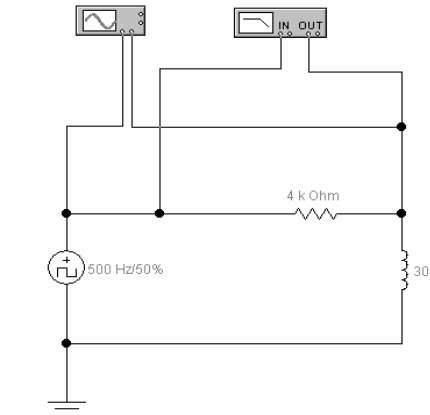


Рис.4.14. Схема исследования вида выходного сигнала при воздействии прямоугольных импульсов.

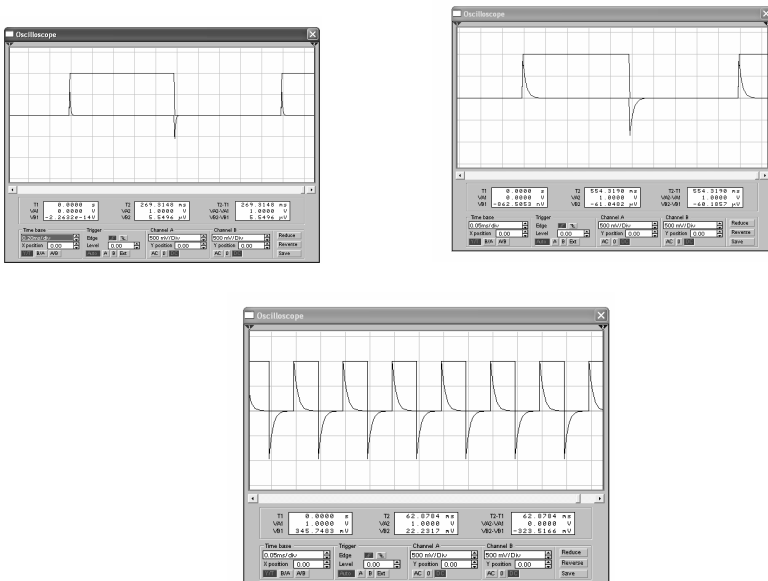


Рис. 4.15. Лицевая панель осциллографа с наблюдаемыми сигналами при разных частотах генератора (500, 2000 и 10000 Гц). Сделать выводы об изменении формы сигнала после прохождения через цепь.

10. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- исходные данные, расчётные формулы и результаты предварительного расчёта, занесённые в таблиц 4.3, 4.4, 4.5;
- схемы измерений;
- результаты измерений АЧХ и ФЧХ исследуемых цепей, занесённые в соответствующие разделы таблиц 4.3, 4.4, 4.5;
- рассчитанные и экспериментальные зависимости $H(f)$ для резистивной цепи и цепи с одним реактивным элементом. Причём, для каждой из цепей рассчитанные и экспериментальные кривые строятся для сравнения на одном графике;
- рассчитанные и экспериментальные зависимости $\varphi(f)$ цепи с реактивным элементом, построенные на одном графике;
- выводы о причинах расхождения в графиках рассчитанных и измеренных АЧХ и ФЧХ цепей;
- осциллограммы сигналов на входе и выходе резистивной цепи и цепи с реактивным элементом;
- рассчитанную формулу переходной характеристики и выражение для отклика на выходе цепи с реактивным элементом, а так же их графики;
- выводы о различиях в формах входного и выходного сигналов и их причинах.

11. Контрольные вопросы

1. Что называется комплексным коэффициентом передачи?
2. Виды комплексного коэффициента передачи?
3. Что такое амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики цепи?
4. Как выполнить измерение амплитудно-частотной характеристики цепи?
5. Как выполнить измерение фазо-частотной характеристики цепи?
6. Что называется передачей сигнала без искажений?
7. Какие должны быть АЧХ и ФЧХ цепи, не вносящих искажений?
8. Чем обусловлены амплитудно-частотные и фазо-частотные искажения?
9. Как влияет на форму выходного сигнала характер изменения амплитудно-частотной характеристики цепи?
10. Что такое переходная характеристика цепи и как её вычислить?
11. Что такое интеграл Дюамеля и как, используя его рассчитать реакцию цепи?
12. Уметь изобразить и объяснить форму выходного сигнала для каждой из схем табл. 1 при входном сигнале, имеющем вид прямоугольного импульса.

Литература

1. Алексеев А. П. Информатика 2003. М.: Солон-Р. 2003 с. 269-239.
2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь, 2009, -592с.
3. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1986, - 544с.
4. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Солон Р. 2001, - 512с.
5. Методические указания к лабораторным работам по 2-й части курса ОТЦ ПГАТИ, Самара, 2000, -90с.
6. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа 1990, - 544с.