

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

Кафедра ТОРС

**Методическое пособие
“Лабораторный практикум
по 2-й части курса Основы теории цепей”**

Самара, 2008

Методическая разработка к лабораторным работам по 2-й части курса ОТЦ «Переходные процессы, временные и частотные характеристики в линейных электрических цепях, длинные линии, нелинейные и автоколебательные цепи» содержит указания по заданию на предварительные расчеты, по выполнению и оформлению результатов, а также краткие теоретические положения к восьми работам по исследованию переходных процессов, частотных характеристик в RLC -цепях, режимов работы длинной линии, нелинейных резистивных и автоколебательных цепей дисциплины “Основы теории цепей”. В дополнении данная разработка содержит пояснения по выполнению указанного цикла работ на ЭВМ. Все эти работы предназначены для выполнения студентами дневной и заочной форм обучения специальностей 201000, 200900, 201100, 200700, 550400.

Составители:

к.т.н., доц. Михайлов В.И., ст. преп. Членова Е.Д.

СОДЕРЖАНИЕ

Методические указания к лабораторным работам	34
по 2-й части курса ОТЦ.....	1
СОДЕРЖАНИЕ.....	2
РАБОТА № 2-1	4
Исследование переходных процессов в RL -цепи	4
РАБОТА № 2-2	14
Исследование переходных процессов в RC -цепи.....	14
РАБОТА № 2-3	23
Исследование переходных процессов в RLC -цепях	23
РАБОТА № 2-5	51
Прохождение прямоугольного импульса	51
через линейную электрическую цепь	51
с ограниченной полосой пропускания.....	51
РАБОТА № 2-6	61
Исследование цепей с нелинейными резистивными	61
элементами	61
РАБОТА № 2-7	71
Исследование RC - генератора синусоидальных	71
колебаний на операционном усилителе.....	71

РАБОТА № 2-1

Исследование переходных процессов в 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. 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.1.1 рассчитать графики $u_R(t)$ и $u_L(t)$ для указанных в таблице 1.1 значений L , R_1 , E , f . Значение t_u принять равным $1/2f$. Результаты расчёта занести в таблицу 2. 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.

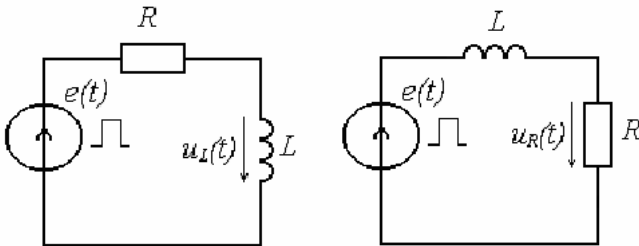


Рис.1.1 Схемы для расчёта переходных процессов $u_R(t)$ и $u_L(t)$

Таблица 1. 1 Исходные данные для расчёта

№ 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

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 1.3.

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.

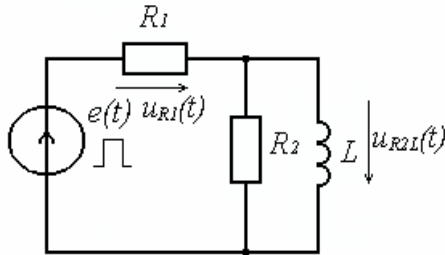


Рис. 1.2 Схема для расчёта переходных напряжений $u_{R1}(t)$ и $u_{R2L}(t)$

Таблица 1.2 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 1.3 Результаты по расчёту и измерению постоянной времени RL -цепи

R , кОм	L , мГн	Постоянная времени τ_L , мкс	
		Расчёт	Эксперимент

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 ЛКТС. 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.

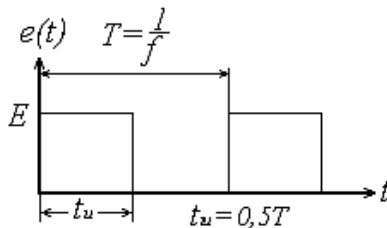


Рис. 1.3 Последовательность прямоугольных импульсов на входе цепи

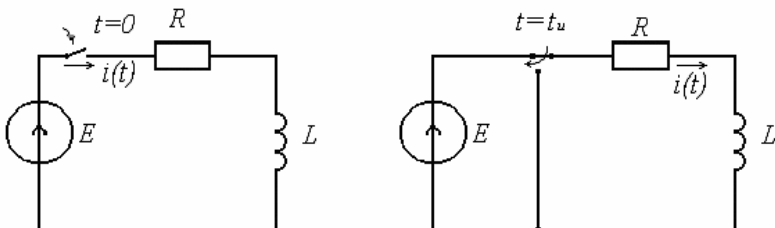


Рис. 1.4 Схема замещения при включении цепи

Рис. 1.5 Схема замещения 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 исследуемой 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:

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

$$U_{R2L}(t) = \frac{ER_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_L}}, \quad B$$

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

$$U_{R2L}(t) = -\frac{ER_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t-t_u}{\tau_L}}, e$$

где $\tau_L = \frac{L(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}$ – постоянная времени исследуемой 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 $u_{R2L}(t)$ 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 ($e \approx 2,718$).

5. Последовательность выполнения работы на стенде ЛКТИЦ

Ознакомиться с лабораторным стендом ЛКТИЦ 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} " \square " 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.

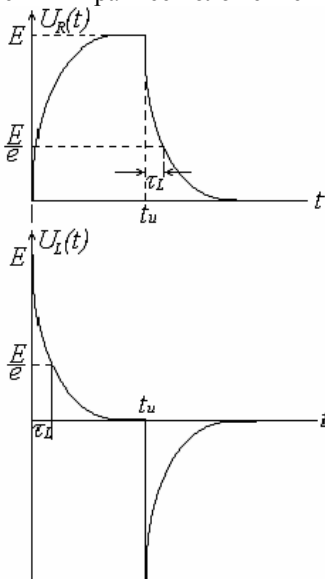


Рис. 1.6 Графики соответствующие включению

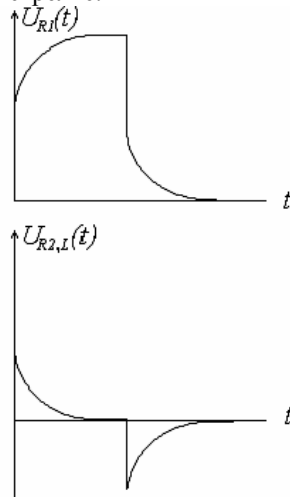


Рис. 1.7 Графики соответствующие выключению

RL – цепи

RL - цепи

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 значение сопротивления R_m в указанных пределах зарисовать на кальку осциллограммы напряжения $u_L(t)$. 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. 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 $u_{RL}(t)$.

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

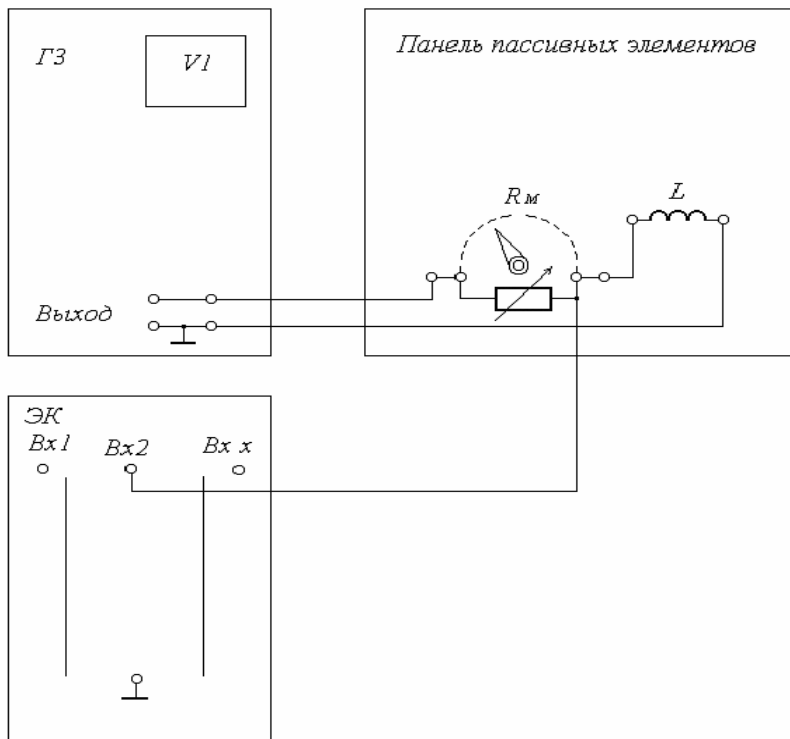


Рис. 1.8 Монтажная схема для проведения измерений

6. Последовательность выполнения работы на ЭВМ

Для подготовки к выполнению работы необходимо включить компьютер и запустить указанную выше программу. 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. 1.1 или 1.2. с виртуальными измерительными приборами: генератором прямоугольных импульсов **-G** и осциллографом **-Oscilloscope**, как показано на рис 1.9. Подробно работа с EWB описана в [6,7]. Ниже приведены методические указания по выполнению данной работы с использованием программы EWB.

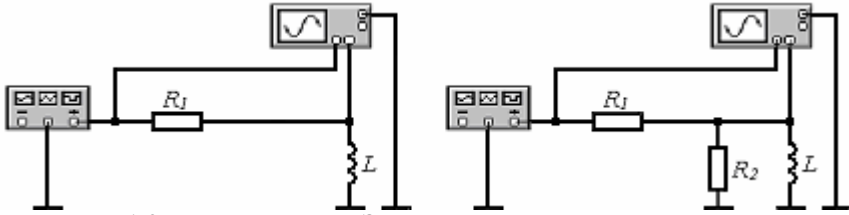


Рис. 1.9. Пример схем на ЭВМ для проведения измерений

Установить по своему варианту величины элементов R и L , а также частоту, амплитуду и вид генерируемых колебаний в исследуемой модели цепи.

“Развернуть” сциллограф и установить “**TIME BASE**” (развёртку по горизонтали) $0,05ms/div$, а масштаб по оси **Y** (вертикали) $500mV/Div$ - для канала **A**, и $500 mV/Div$ или $1V/Div$ - для канала **B**, режимы **Y/T**, **AUTO**, **DC**, **Y POS** -0.00 , как показано на рис. 1.10

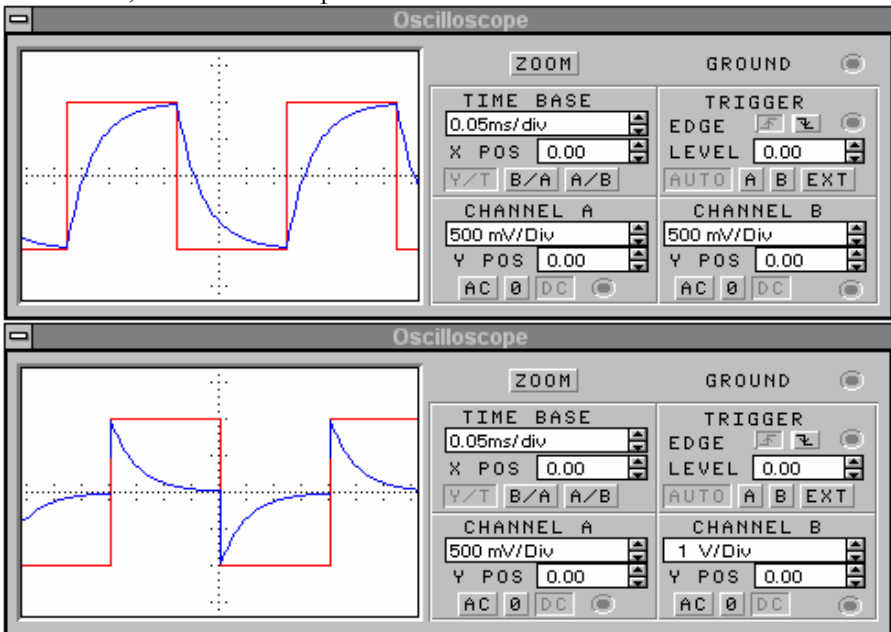


Рис. 1.10. Пример установки режимов работы осциллографа

Запустить схему на моделирование, выключить моделирование через $40 ms$. Перевести осциллограф в режим **ZOOM**.

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 **ZOOM** определить постоянную времени τ_L .

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 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 $u_L(t)$ 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. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь, с..
2. 2000Попов В. П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа. 2000. с. 306-369.
3. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. М.: Энергоатомиздат, 1989, с.234-243.

4. 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.

5. Акчурина Н. Г., Чернышёва Л. П. Методическая разработка к лабораторной работе "Изучение измерительных приборов и элементной базы универсального стенда ЛКТЦ для выполнения лабораторных работ по курсу ТЭЦ". Куйбышев. КЭИС, 1990, 20с.

6. Алексеев А. П. Информатика 2001. М.: Солон-Р. 2001.

7. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Солон-Р. 1999, - 512с.

8. Михайлов В. И., Цаплин Н. Н. Программа Electronics Workbench (EWB) и её применение. Самара. ПГАТИ 2000, - 18с.

В СОДЕРЖАНИЕ.....2

РАБОТА № 2-2

Исследование переходных процессов в 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 ЛКЦЦ.

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.

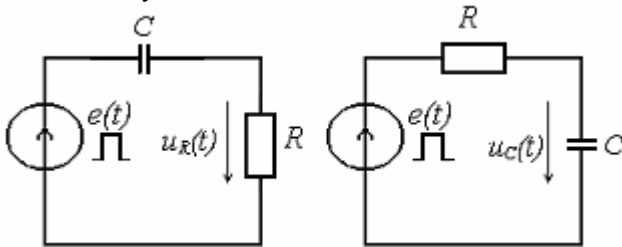


Рис.2.1 Схема для расчёта переходных процессов $u_R(t)$ и $u_C(t)$

Таблица 2.1 Исходные данные для расчёта

№ 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 Результаты расчёта переходных напряжений

	t	θ	τ_c	$2\tau_c$	$3\tau_c$
$0 \leq t \leq t_u$	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.

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

Таблица 2.3 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.

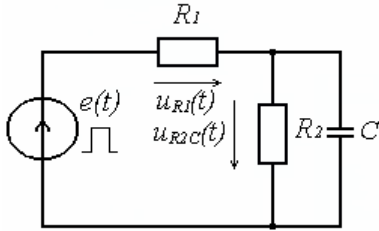


Рис. 2.2 Схема для расчёта переходных напряжений $u_{R1}(t)$ и $u_{R2C}(t)$

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 ЛКТС. 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.

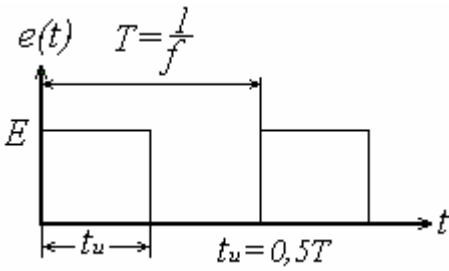


Рис. 2.3 Последовательность прямоугольных импульсов на входе цепи

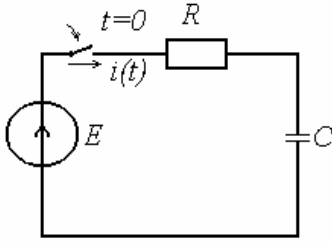


Рис. 2.4 Схема замещения при включении RC - цепи

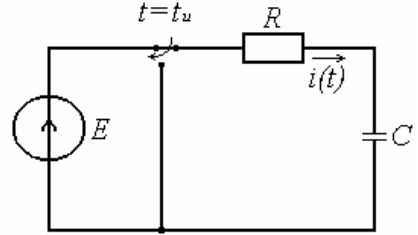


Рис. 2.5 Схема замещения при выключении RC - цепи

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

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

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

а при выключении в схеме рис. 2.5:

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

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

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:

$$\left. \begin{aligned} U_{R_1}(t) &= E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau}} \right), B \\ U_{R_2C}(t) &= \frac{ER_2}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), B \end{aligned} \right\} 0 \leq t \leq t_u \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{aligned} U_{R_2C}(t) &= \frac{ER_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t-t_u}{\tau}}, B \\ U_{R_1}(t) &= -\frac{ER_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t-t_u}{\tau}}, B \end{aligned} \right\} t \geq t_u \quad (2.4)$$

где $\tau_C = C \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$ — 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 ($e \approx 2,718$).

5. Последовательность выполнения работы

Ознакомиться с лабораторным стендом ЛКТИЦ 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.

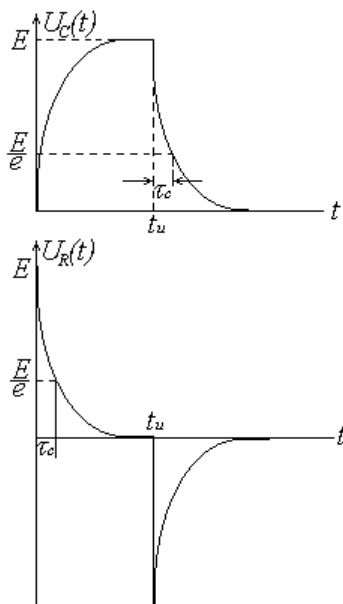


Рис. 2.6 Графики соответствующие включению RC – цепи

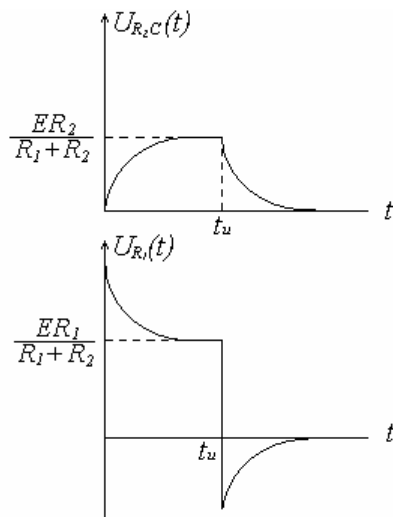


Рис. 2.7 Графики соответствующие выключению RC - цепи

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 $u_{RC}(t)$.

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

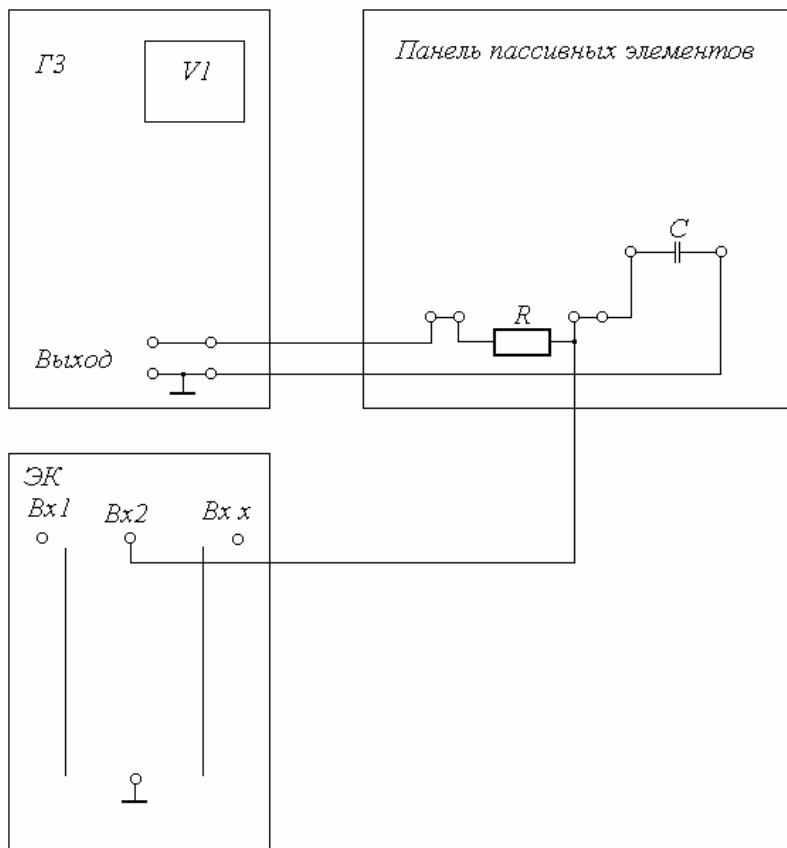


Рис. 2.8 Монтажная схема для проведения измерений

6. Последовательность выполнения работы на ЭВМ

Для подготовки к выполнению работы необходимо включить компьютер и запустить указанную выше программу. 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 **-G** 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.

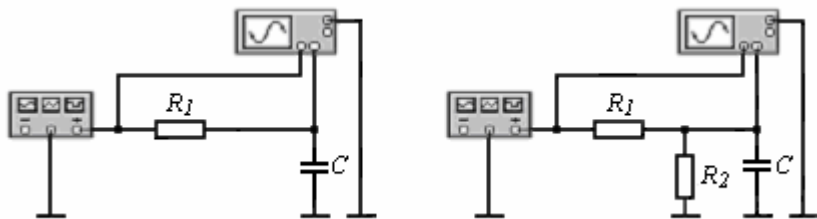


Рис.2.9. Пример схем на ЭВМ для проведения измерений

Установить по своему варианту величины элементов R и L , а также частоту, амплитуду и вид генерируемых колебаний в исследуемой модели цепи.

“Развернуть” сциллограф и установить “**TIME BASE**” (развёртку по горизонтали) $0,05ms/div$, а масштаб по оси **Y** (вертикали) $500mV/Div$ - для канала **A**, и $500 mV/Div$ или $1V/Div$ - для канала **B**, режимы **Y/T**, **AUTO**, **DC**, **Y POS** -0.00 , как показано на рис. 2.10

Запустить схему на моделирование, выключить моделирование через 4 ms. Перевести осциллограф в режим **ZOOM**.

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 **ZOOM** определить постоянную времени τ_C .

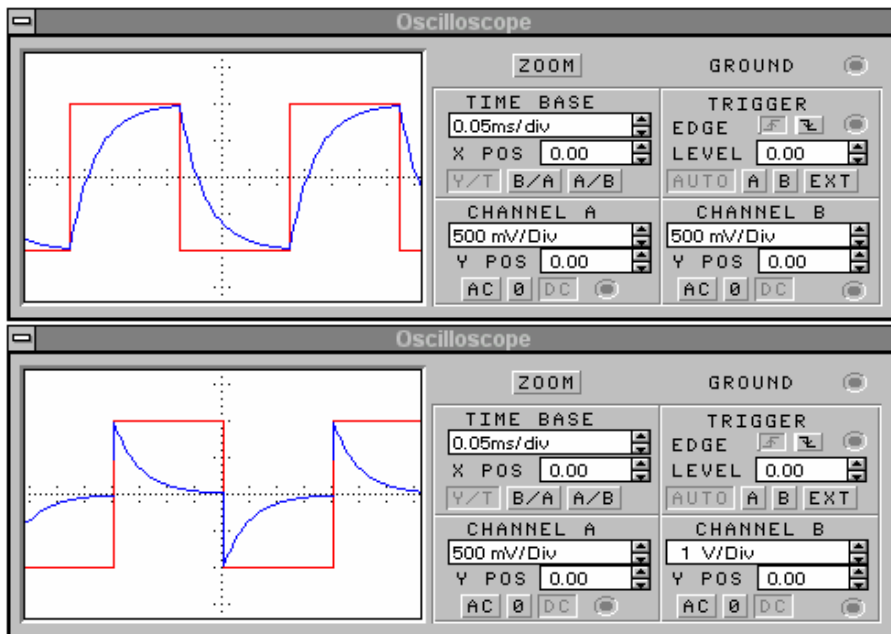


Рис. 2.10. Пример установки режимов работы осциллографа

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 $u_C(t)$ 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. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2000
2. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. М. : Энергия, 1969, с. 199-206.
3. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. М.: Энергоатомиздат, 1989, с.234-243.
4. 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.
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. Алексеев А. П. Информатика 2001. М.: Солон-Р. 2001.
7. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Солон Р. 1999, - 512с.
8. Михайлов В.И , Алексеев А.П Методические указания к лабораторным работам по курсу ТЭЦ “Исследование нелинейных цепей с помощью пакета Electronics Workbench” , кафедра ТЭЦ ПГАТИ Самара, 2000.

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 ЛКТЦ, 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 ЛКТЦ или ЭВМ и по таблице 3.2 при выполнении на макетах. Дополнительные варианты N для ЭВМ можно

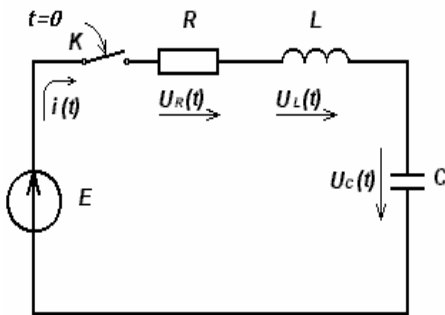


Рис. 3.1. Схема последовательной RLC -цепи

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 $R_{кр}$, построить качественно графики $u_{LC}(t)$ при $R_i < R_{кр}$ и $R_i > R_{кр}$ и вывести формулу расчета корней характеристического уравнения.

Таблица 3.1. Исходные данные для стенда ЛКТЦ и ЭВМ

№ бригады	$f(t)$	L, мГн	C, нФ	R, Ом	E = 2 В, f = 0.5 кГц,
1	$u_R(t)$	30	14,9	500	
2	$u_L(t)$	35	14,9	500	
3	$u_C(t)$	40	14,9	500	
4	$u_R(t)$	45	14,9	10000	

5	$u_L(t)$	50	14,9	10000	$t_u=1$ мс, $R_1=500$ Ом.
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_u , 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 рассматривать 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:

$$u_R + u_L + u_C = e(t), \quad Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = E.$$

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:

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

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

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

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

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 $T_{св}$ и Δ применяются формулы:

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

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

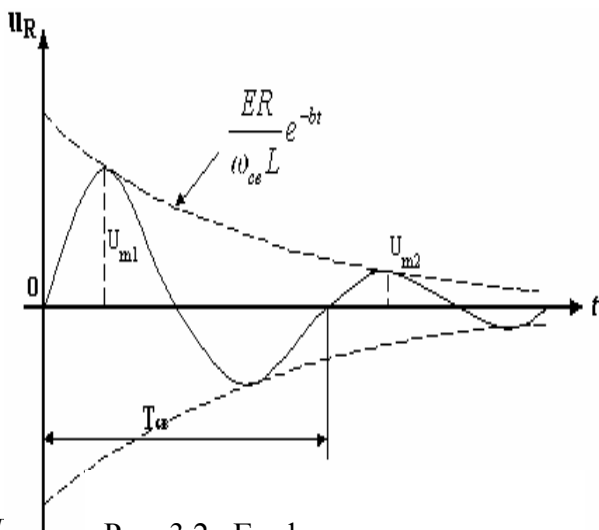


Рис. 3.2. График напряжения на резисторе при колебательном характере переходного процесса

Колебательный переходный процесс 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.

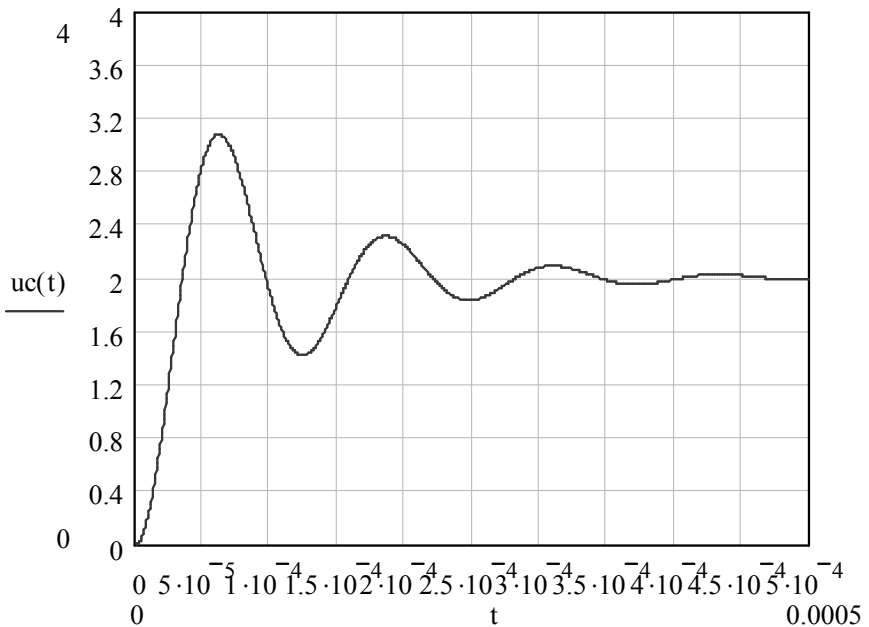


Рис. 3.2а Пример графика напряжения на емкости.

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

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

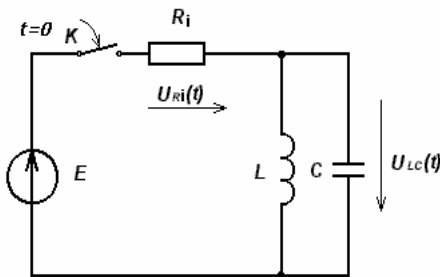
На рисунке 3.3 представлена схема параллельной LC – цепи, подключаемой к источнику постоянного напряжения через сопротивление R_i . Для расчетов процессов в этой цепи рекомендуется применить операторный метод расчета переходных процессов.

Операторное выражение для напряжения получается следующим:

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

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

5. Последовательность выполнения работы на стенде ЛКТС

5.1. Подготовить встроенные генератор и осциллограф стенда ЛКТС к работе. Для этого 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} – ‘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 “внутр. “. 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.

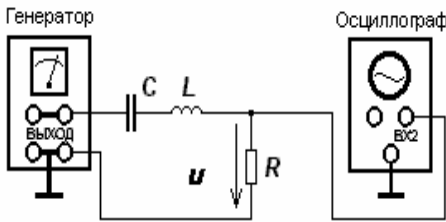


Рис. 3.5. Схема исследования последовательной цепи

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 $u_{LC}(t)$ при $R_i < R_{iкр}$ и $R_i > R_{iкр}$

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-

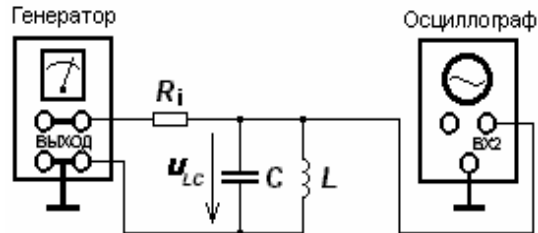


Рис. 3.6. Схема исследования параллельной цепи

(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 данной работы на ЭВМ возможно в двух вариантах:

6.1 –по файлам специальных программ **Rab2-6ct.exe** и **Lb26ct.exe** (папки **ТЭЦ/ТЭЦ2 (Tez-2)**) при использовании данных таблицы 3.1 и по программам **Rab2-6.exe** и **Lb26.exe** по данным таблицы 3.2. В этом случае выполнение осуществляется по указаниям в самих программах;

6.2 –по пакету программ **Electronics Workbench 4.0 (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.

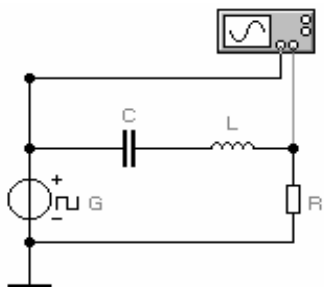


Рис. 3.7. Схема исследования цепи на

следование, выключить моделирование через 4 ms. Перевести осциллограф в режим **ZOOM**. 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 **ZOOM** определить параметры переходного процесса T_{CB} и Δ .

6.2.1 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).

6.2.2 “Развернуть” осциллограф 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.

6.2.3 Запустить схему на моделирование,

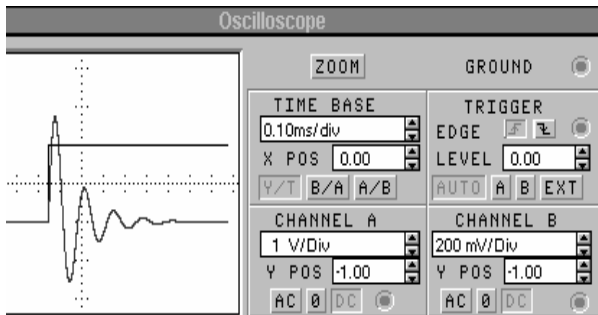


Рис. 3. 8. Внешний вид осциллографа

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

6.2.5. Повторить “эксперимент”, меняя 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_{KP} и 10000 Ом. Для этого нужно отсоединить проводники от элементов, переставить элементы в нужном порядке, а затем соединить их.

6.2.6. Выполнить исследования по получению осциллограмм u_{LC} для параллельной LC -цепи по схеме аналогичной рис. 3.6 при $Ri = 500$, ($<Ri_{KP}$) и 3000 Ом ($>Ri_{KP}$). Определить по осциллограмме и теоретически T_{CB} и Δ (для теоретического расчета необходимо определить корни характеристического уравнения параллельной цепи).

6.2.7. 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 $Ri <, =, > Ri_{KP}$, 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_{CB} 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 апериодическом, 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. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2000, с.
2. Бакалов В. П., Крук Б. И., Журавлева О. Б. Теория электрических цепей. СИБГАТИ, Новосибирск, 1998, с. 112-133.
3. Попов В.П. Основы теории цепей. -М.: Высшая школа, 2000, с. 306-351.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. –М.: Гардарики, 1999, с. 226-283.
5. Зевеке Г. В. и др., Основы теории цепей. -М.: Энергоатомиздат. 1989, с. 234 - 250.
6. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 212 – 272.
7. Алексеев А. П. Информатика 2001. М.: Солон-Р. 2001.
8. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. –М.: Солон-Р, 2000. - 512с.
9. Михайлов В.И., Алексеев А.П Методические указания к лабораторным работам по курсу ТЭЦ “Исследование нелинейных цепей с помощью пакета Electronics Workbench” , кафедра ТЭЦ ПГАТИ,, Самара, 2000.
10. 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.

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.

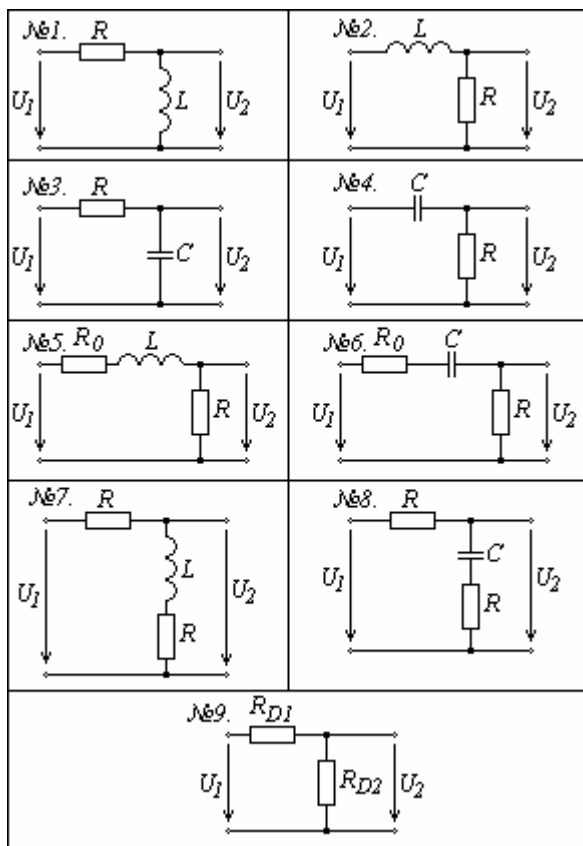
3. Задание на предварительный расчёт

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.

Таблица 4.1 Схема для исследования частотных и временных характеристик



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 фазочастотных характеристик исследуемых схем, а также переходную характеристику исследуемой схемы.

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:

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

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

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

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

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.

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 $\underline{I} = \underline{U}_1 / (R + j\omega L)$. Запишем с учётом этого выражение $H(j\omega)$ и приведём его к виду (4.2):

$$H(j\omega) = \frac{j\omega L}{R + j\omega L} = \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2\omega L}{R}\right)}$$

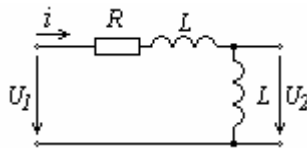


Рис. 4.1 Пример схемы для определения коэффициента передачи

Таким образом, выражения АЧХ и ФЧХ схемы рис.1 имеют следующий вид:

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

Графики, построенные качественно в соответствии с этими выражениями, приведены на рис. 4.2а и 4.2б.

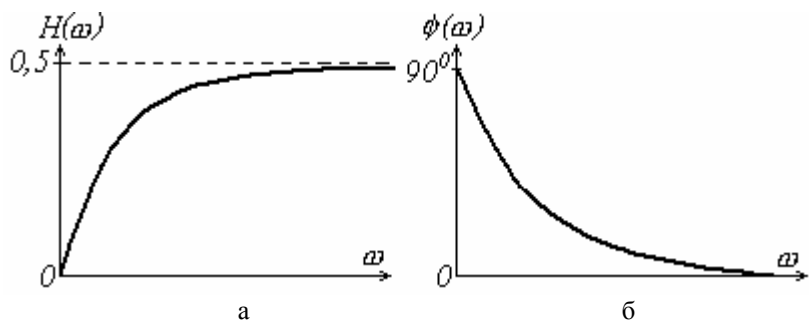


Рис. 4.2 Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики схемы рис. 1.

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_z (рис 3).

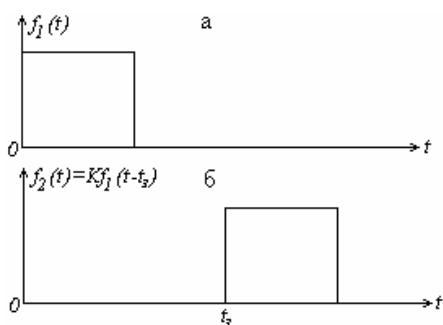


Рис. 4.3 Форма воздействия (а) и отклика (б) при передаче электрического сигнала без искажений

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 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 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:

$$h(t) = \frac{H(p)}{p},$$

где $H(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)}$ — операторный коэффициент передачи цепи,

p — комплексная переменная операторного метода расчёта переходных процессов /1/. С её использованием на основании интеграла Дюамеля реакция на выходе цепи $y(t)$ при воздействии в виде прямоугольного импульса определяется выражением:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ U_n * h(t), & 0 \leq t \leq t_n; \\ U_n * h(t) - U_n * h(t - t_n), & t \geq t_n. \end{cases}$$

Здесь U_n — амплитуда импульса, t_n — его длительность.

5. Последовательность выполнения работы

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

6. Выполнение работы на стенде ЛКТИЦ

При выполнении работы на стенде ЛКТИЦ 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. Составить схему рис. 4.4, которая соответствует схеме №9 из таблицы 4.1. Значения параметров элементов взять из таблицы 4.2.

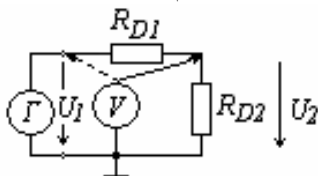


Рис. 4.4 Схема измерения амплитудно-частотной характеристики резистивного делителя

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

Контролируя вольтметром V выходное напряжение генератора U_1 и подерживая его с помощью регулятора выходного напряжения на плате ГЗ равным 1В, измерить напряжение U_2 на сопротивлении R_{D2} . При этом условии показания вольтметра будут численно равны АЧХ цепи $H(\omega)$. Измерения АЧХ

произвести на частотах, указанных в таблице 4.2, а результаты измерений 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. 4.5. При сборке схемы в качестве резистора R_0 (если он есть в схеме) использовать магазин сопротивлений R_M , расположенный на плате пассивных элементов стенда.

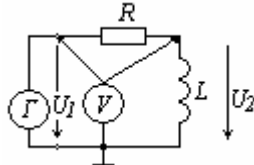


Рис. 4.5 Схема измерения АЧХ цепи с реактивным элементом

Выполнить аналогичные измерения $H(\omega)$ 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. 4.6 с использованием схемы варианта заданного в таблице 4.1.

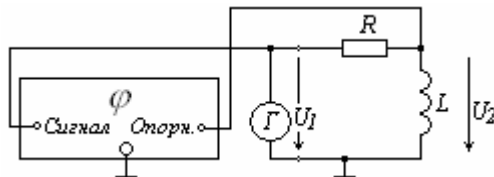


Рис. 4.6 Пример схемы измерения ФЧХ цепи с реактивным элементом

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. 4.7, 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 ÷ 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 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 выше программу. После входа в программу вызвать из памяти файл с нужной схемой либо собрать нужную схему самому, используя элементы из панели пассивных элементов. Установить значения элементов схемы в соответствии с заданием таблицы 4.1.

1. Измерение амплитудно-частотных характеристик.

Для снятия амплитудно-частотной характеристики делителя напряжения необходимо собрать схему рис.4. 7.

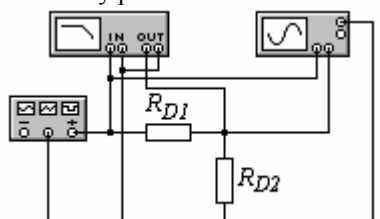


Рис. 4.7 Схема наблюдения сигналов на входе и выходе резистивного делителя

На генераторе установить режим гармонических колебаний, выбрать одну из частот указанных в таблице 4.2. Пример установки частоты и выходного напряжения приведён на рис. 4.8.

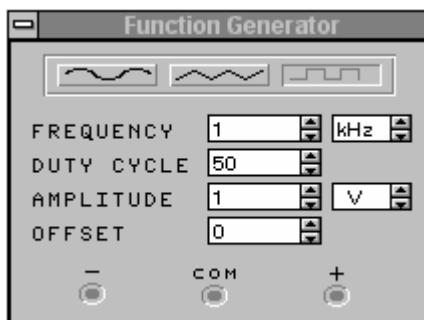


Рис. 4.8 Лицевая панель функционального генератора.

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. Занести данные измерений в таблицу 4.3.

Установить на выходе генератора режим прямоугольных колебаний. Наблюдать за изменением формы выходного сигнала. Сделать выводы об

изменении входного сигнала и форме амплитудно-частотной характеристики цепи.

Для измерения АЧХ цепи с реактивным элементом, заданной в таблице 4.1, собрать схему, аналогичную схеме рис. 4.9. Установить значения элементов схемы в соответствии с номером бригады из таблицы 4.2. Установить на генераторе одну из частот указанных в таблице 4.2 и напряжение 1В.

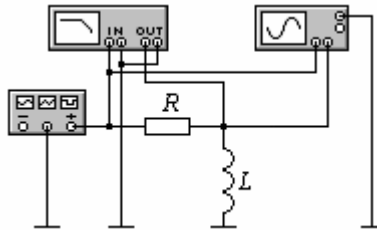


Рис. 4.9 Схема измерения АЧХ и ФЧХ цепи с реактивным элементом

Таблица 3

Параметры цепи	Частоты (кГц)					
	$T(j\omega)$					
$R_{D1} =$	Расчётные данные					
$R_{D2} =$	Измеренные данные					

Изменяя частоту генератора в соответствии с данными таблицы 4.2 наблюдать по осциллографу за изменением входного сигнала, а по измерителю частотных характеристик за АЧХ исследуемой цепи. Пример измерения АЧХ цепи представлен на рис. 4.10.

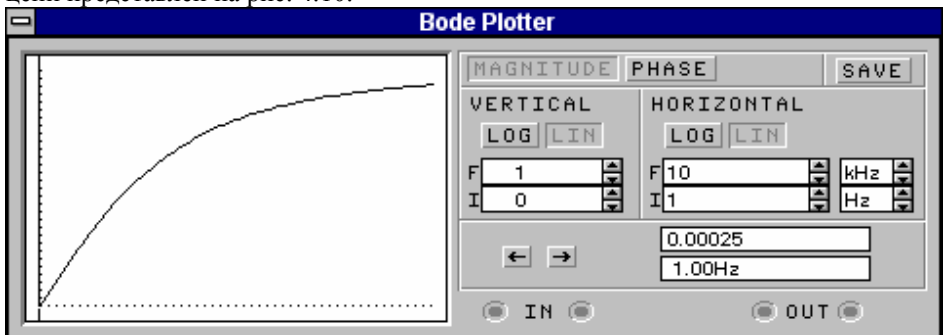


Рис. 4.10. Лицевая панель измерителя частотных характеристик

Результаты измерений занести в таблицу 4.4. Изменить значение сопротивления в соответствии с таблицей 4.2 и проделать те же измерения что и ранее. Сделать выводы о проделанных измерениях. Зарисовать наблюдаемую АЧХ цепи.

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 на панели измерителя частотных характеристик и прочитав получившийся при этом файл с помощью программы Word.

Таблица 4.4 Результаты предварительного расчёта и экспериментальных измерений АЧХ цепи

Параметры цепи	Частота (кГц)					
	$H(\omega)$					
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.

Собрать схему аналогичную схеме рис. 4.9. На измерителе частотных характеристик установить переключатель вида характеристики в положение PHASE. Наблюдать за фазочастотной характеристикой по измерителю частотных характеристик. Результаты измерений занести в таблицу 4.5.

Изменить значение сопротивления в соответствии с таблицей 4.2 и проделать те же измерения что и ранее. Зарисовать получившуюся при этом ФЧХ цепи. Сделать выводы о проделанных измерениях.

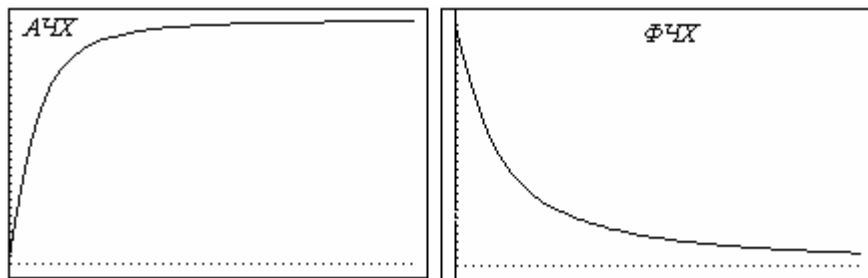


Рис. 4.11 Образцы измерения АЧХ, ФЧХ цепи

Численное значение сдвига фаз можно определить путём перемещения визира на измерителе частотных характеристик и считывая в соответствующих окошках значение частоты и значение фазы; либо по осциллографу, зная частоту развёртки и период заданных колебаний. Если нажать кнопку SAVE на панели измерителя частотных характеристик, то получим файл с фазочастотной характеристикой. Этот файл можно прочитать с помощью программы Word.

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 гармонический сигнал.

Таблица 4.5 Результаты предварительного расчёта и экспериментальных измерений ФЧХ цепи

Параметры Цепи	Частота (кГц)					
	$\varphi(j\omega)$					
L = или C = R = R ₁ =	Расчётные данные					
	Измеренные данные					
L = или C = R = R ₂ =	Расчётные данные					
	Измеренные данные					

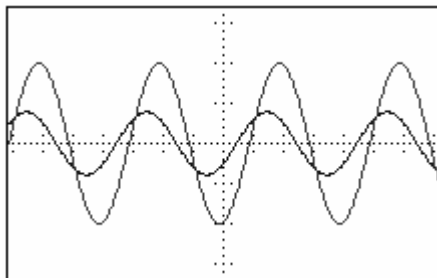


Рис. 4.12 Осциллограммы входного и выходного гармонического напряжений

Собрать схему аналогичную рис. 4.9. На генераторе переключатель вида работы установить в положение гармонических колебаний. Установить одну из частот, указанных в таблице 4.2. На осциллографе наблюдать форму входного и выходного сигналов. Пример наблюдения входного и выходного сигналов представлен на рис. 4.12.

В качестве передаваемого сигнала возьмём последовательность прямоугольных импульсов.

Собрать схему аналогичную рис.4.9. На генераторе переключатель вида работы установить в положение прямоугольных импульсов. Частоту генератора вначале установить малую $f = 500$ Гц (t_n большое) и получить реакцию близкую к переходной характеристике, затем большую $f = 2$ кГц (t_n 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. Сделать выводы об изменении формы сигнала после прохождения через цепь. Пример наблюдения входного и выходного сигналов представлен на рис. 4.13.

Убедиться в том, что на гармоническом сигнале невозможно заметить амплитудно-частотные искажения сигнала.

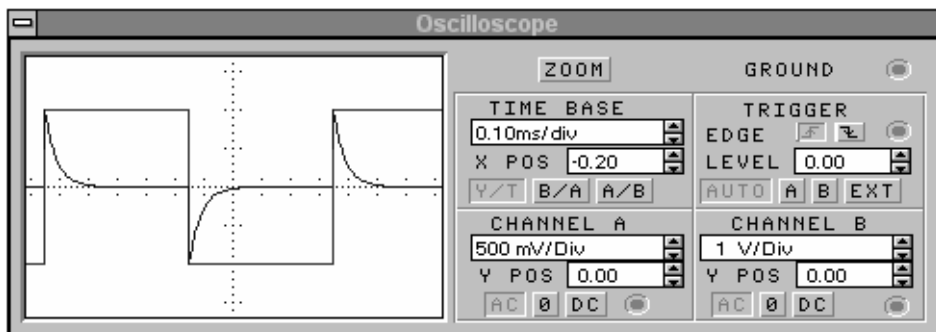


Рис. 4.13 Лицевая панель осциллографа с наблюдаемыми сигналами

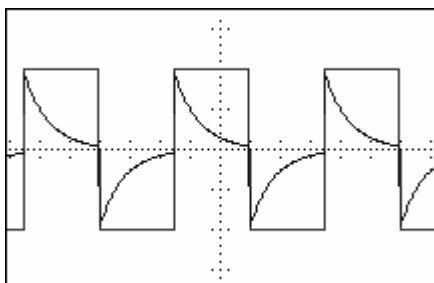


Рис. 4.14 Форма входного и выходного сигнала последовательности прямоугольных импульсов

11. 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 $H(\omega)$ 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 $\varphi(\omega)$ 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.

12. 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.

10. Литература

1. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2000
2. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1986, - 544с.
3. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа1990, - 544с.
4. Алексеев А. П. Информатика 2001. М.: Солон-Р. 2001.
5. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. – М.: Солон Р. 1999, - 512с.
6. Михайлов В. И., Цаплин Н. Н. Программа Electronics Workbench (EWB) и её применение. Самара. ПГАТИ 2000, - 18с.
7. Методические указания к лабораторным работам по 2-й части курса ОТЦ, ПГАТИ, Самара, 2000.

РАБОТА № 2-5

Прохождение прямоугольного импульса через линейную электрическую цепь с ограниченной полосой пропускания

8. Цель работы

Экспериментальная проверка влияния соотношения ширины полосы пропускания линейной электрической цепи и ширины спектра прямоугольного импульса на его форму при передаче через данную цепь.

9. Задание на подготовку к лабораторной работе

1. Изучить теорию по рекомендованной ниже литературе.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
3. Выполнить предварительный расчет и подготовить бланк отчета.
4. Ознакомиться с порядком выполнения работы.

10. Задание на предварительный расчет

Рассчитать и построить спектр амплитуд одиночного прямоугольного импульса напряжения с амплитудой U и длительностью t_u . Исходные данные для предварительного расчета выбираются из таблицы 5.1 в соответствии с номером бригады.

4. Пояснения к предварительному расчету

Для характеристики непериодических сигналов используется понятие спектральной плотности $F(j\omega)$, которая определяется с помощью двухстороннего преобразования Фурье:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt \quad (5.1)$$

$f(t)$ – аналитическое выражение непериодического сигнала.

Таблица 5.1. Исходные данные для предварительного расчета

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Параметры										
Амплитуда импульсов,	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4

$U(B)$										
Длительность имп., t_u (мкс)	45	155	120	100	85	75	70	60	55	50
Частота след. имп., f (кГц)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Частота среза ФНЧ., (кГц)	13	4	5	6	7	8	9	10	11	12

В результате прямого преобразования Фурье непериодическая функция времени представляется в виде бесконечно большого числа гармонических составляющих, возникших бесконечно давно и существующих бесконечно долго. Амплитуды гармонических составляющих бесконечно малы.

Модуль спектральной плотности $|F(j\omega)|$ определяет распределение относительных значений амплитуд гармонических составляющих импульса по частотам этих составляющих и называется **спектром амплитуд**. Аргумент спектральной плотности определяет значения начальных фаз составляющих и называется **спектром фаз непериодического сигнала**.

Выражение $F(j\omega)$ может быть записано в следующем виде:

$$F(j\omega) = |F(j\omega)| \cdot e^{j \arg F(j\omega)} = F(\omega) \cdot e^{j\theta(\omega)},$$

Где $F(\omega)$ - выражение спектра амплитуд;

$\theta(\omega)$ - выражение спектра фаз сигнала.

В соответствии с теоремой Релея (равенством Парсеваля) энергия одиночного импульса W , выделяющаяся в активном сопротивлении R , определяется по формуле:

$$W = \frac{1}{\pi R} \int_0^{\infty} F^2(\omega) \cdot d\omega. \quad (5.2)$$

Для передачи непериодического сигнала без искажений необходимо, чтобы амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики цепи удовлетворяли условиям передачи без искажений в области частот $0 \div \infty$.

Однако реализация цепей с подобными характеристиками практически невозможна. В связи с этим для непериодических сигналов вводится понятие «ширина спектра сигнала».

Шириной спектра одиночного импульса называется область частот, в которой сосредоточено 90% энергии сигнала. Если в данной области частот амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики цепи удовлетворяют условиям передачи без искажений, то в этом случае форма отклика в достаточной степени соответствует форме воздействия.

Ширина спектра одиночного импульса зависит от его длительности.

На основании теоремы подобия спектральная плотность функции $f(kt)$ определяется следующим выражением: $f(kt) = \frac{1}{k} \cdot F\left(j\frac{\omega}{k}\right)$, где k – постоянная величина, определяющая изменение масштаба импульсного сигнала по времени, и равная отношению исходной длительности импульса к ее измененному значению.

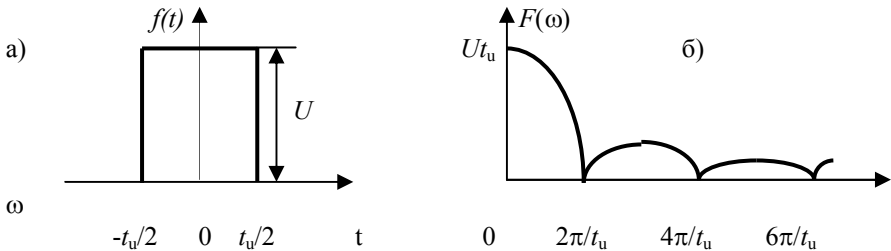


Рис. 5.1. Одиночный прямоугольный импульс (а) и график его спектра амплитуд (б)

Следовательно, увеличение длительности импульса вызывает сжатие его спектра амплитуд и увеличение амплитуд гармонических составляющих спектра.

В технике связи широко применяются сигналы в виде прямоугольных импульсов (рисунок 5.1а).

Выражение модуля спектральной плотности данного сигнала, полученное на основании формулы (5.1), имеет следующий вид:

$$F(\omega) = U t_u \cdot \left| \frac{\sin \frac{\omega t_u}{2}}{\frac{\omega t_u}{2}} \right| \quad (5.3)$$

График спектра амплитуд одиночного импульса прямоугольной формы приведен на рисунке 5.1б. При выполнении предварительного расчета надо иметь в виду, что график спектра амплитуд имеет ряд характерных точек.

В частности, при $\omega = 0$ $F(\omega) = U t_u$, а на частотах $2\pi/t_u, 4\pi/t_u \dots 2n\pi/t_u$, где $n=1,2,3,\dots$, $F(\omega) = 0$. В связи с этим для построения графика достаточно по выражению (5.3) рассчитать $F(\omega)$ на частотах $\pi/t_u, 3\pi/t_u$ и $5\pi/t_u$.

На основании выражения (5.2) можно показать, что в диапазоне частот $0 \div \pi/t_u$ сосредоточено 77% полной энергии прямоугольного импульса, а в диапазоне $0 \div 2\pi/t_u$ - 90% энергии сигнала. Следовательно, граничной частотой ширины спектра одиночного прямоугольного импульса является частота $\omega = 2\pi/t_u$.

В качестве цепи с ограниченной полосой пропускания может использоваться фильтр нижних частот (ФНЧ). Идеальным фильтром нижних частот называется цепь, пропускающая без ослабления спектральные составляющие в полосе частот $0 \div \omega_c$ (полосе пропускания), где ω_c - частота среза ФНЧ, и не пропускающая спектральные составляющие с частотами, превышающими частоту среза.

Фазо-частотная характеристика идеального ФНЧ линейна. Графики амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик идеального фильтра нижних частот показаны сплошной линией на рисунках 5.2а и 5.2б. Очевидно, что в полосе пропускания идеальный ФНЧ удовлетворяет условиям передачи без искажений. Пунктиром на рисунках 5.2а и 5.2б показаны характеристики реального фильтра нижних частот.

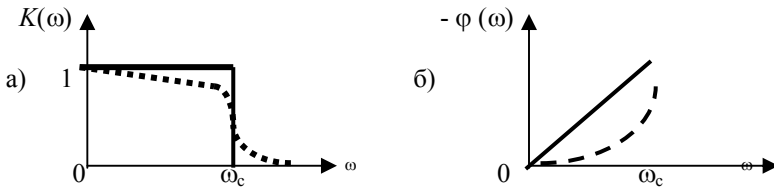


Рис. 5.2. Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) характеристики идеального и реального ФНЧ

Известно, что спектр амплитуд отклика равен произведению спектра амплитуд воздействия на модуль комплексного коэффициента передачи.

Следовательно, при прохождении прямоугольного импульса через фильтр нижних частот в спектре отклика в случае идеального ФНЧ будут отсутствовать спектральные составляющие с частотами, превышающими частоту среза, а в случае реального ФНЧ – они будут сильно ослаблены, что и приводит к искажению сигнала.

На рисунке 5.3 показана качественно форма отклика при различных соотношениях между длительностью импульса t_u и частотой среза ω_c ФНЧ.

Пунктирной линией на рисунке 5.3 показано форма воздействия в виде прямоугольного импульса. Она может быть рассчитана на основе обратного преобразования Фурье от спектра выходного сигнала:

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_{\text{вых}}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

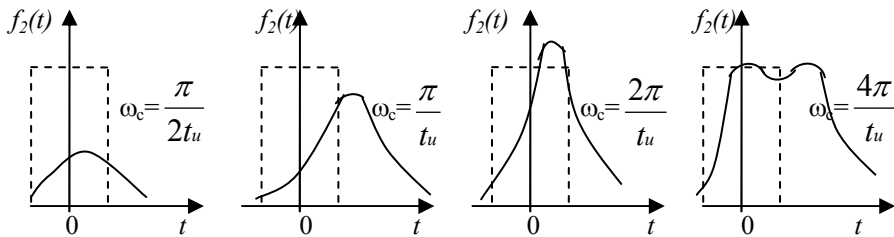


Рис. 5.3. Форма отклика при различных соотношениях между длительностью прямоугольного импульса t_u и частотой среза ω_c фильтра нижних частот

Из приведенных рисунков следует, что чем больше длительность прямоугольного импульса t_u , тем уже его спектр и тем ближе форма отклика к форме воздействия при неизменном значении частоты среза ω_c .

5. Последовательность выполнения работы

5.1. Собрать схему по рисунку 5.4 и измерить амплитудно-частотную характеристику исследуемой цепи. Для этого, поддерживая напряжение на выходе генератора $U_1 = 1 \text{ В}$, измерить с помощью вольтметра напряжение U_2 на частотах, указанных в таблице 5.2. При $U_1 = 1 \text{ В}$ измеренное напряжение (в вольтах) численно равно значению амплитудно-частотной характеристики. Данные измерений занести в таблицу 5.2.

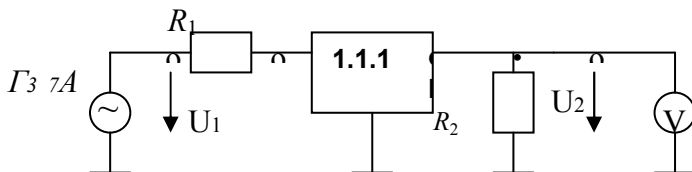


Рис. 5.4. Схема измерения амплитудно-частотной характеристики фильтра нижних частот

Таблица 5.2. Данные измерения частотной характеристики ФНЧ

Частоты	$\frac{f_c}{20}$	$\frac{f_c}{10}$	$\frac{f_c}{5}$	$\frac{f_c}{2}$	$\frac{f_c}{1,5}$	f_c	$1,5 f_c$	$3 f_c$
f (кГц)								

ω (рад/с)								
$K(\omega)$								

5.2. По результатам измерений построить амплитудно-частотную характеристику фильтра нижних частот, как функцию угловой частоты ω , на том же рисунке, где изображен рассчитанный спектр амплитуд прямоугольного импульса. Затем на том же рисунке построить график спектральной плотности амплитуд выходного сигнала.

5.3. Подключить осциллограф непосредственно к выходу генератора Г5-6А и установить на генераторе значения амплитуды U , частоты следования импульсов f_u и длительности импульсов t_u в соответствии с данными предварительного расчета из таблицы 1. Зарисовать на кальку осциллограмму одиночного прямоугольного импульса, установив ручки «усиление X» и «усиление Y» на осциллографе так, чтобы амплитуда импульса равнялась примерно 4 см, а длительность – 2 см. В дальнейшем ручку «усиление Y» не трогать.

5.4. Собрать схему рисунка 5.5 и на той же кальке зарисовать осциллограмму напряжения U_2 при тех же положениях ручек усиления по осям «X» и «Y», что и при снятии осциллограммы прямоугольного импульса.

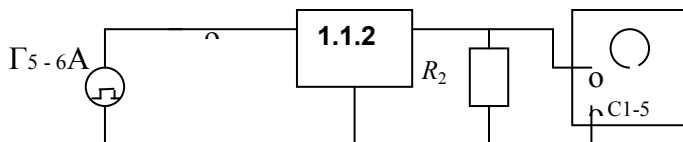


Рис. 5.5. Схема для наблюдения формы отклика при прохождении прямоугольного импульса через фильтр нижних частот

5.5. Повторить п.п.6.3 и 6.4 при следующих значениях длительности импульсов $0,5t_u$; $1,5t_u$; $2t_u$; $5t_u$. При этом амплитуда и частота следования импульсов не изменяются.

6. Выполнение работы на ЭВМ

Для выполнения данной работы на ЭВМ следует запустить программу ВООЛ_3.0 по ярлыку или из директория программы по запускающему файлу (menu.exe. bat...), далее найти тренажерный блок Т44-49 «Спектры периодических сигналов», используя клавиши перемещения курсора. Затем войти в него нажатием клавиши Enter, выбрать строчку «самообучение», далее выбрать тему «прохождение периодических импульсов через цепь».

После этого необходимо выбрать сигнал в виде прямоугольного импульса и RLC-цепь (рис.5.6). Затем ввести данные импульса: период $T=1/f=2$ мс, амплитуду U , половину длительности импульса t_1 и данные цепи (2 кОм, 100 мГн, 40 нФ)

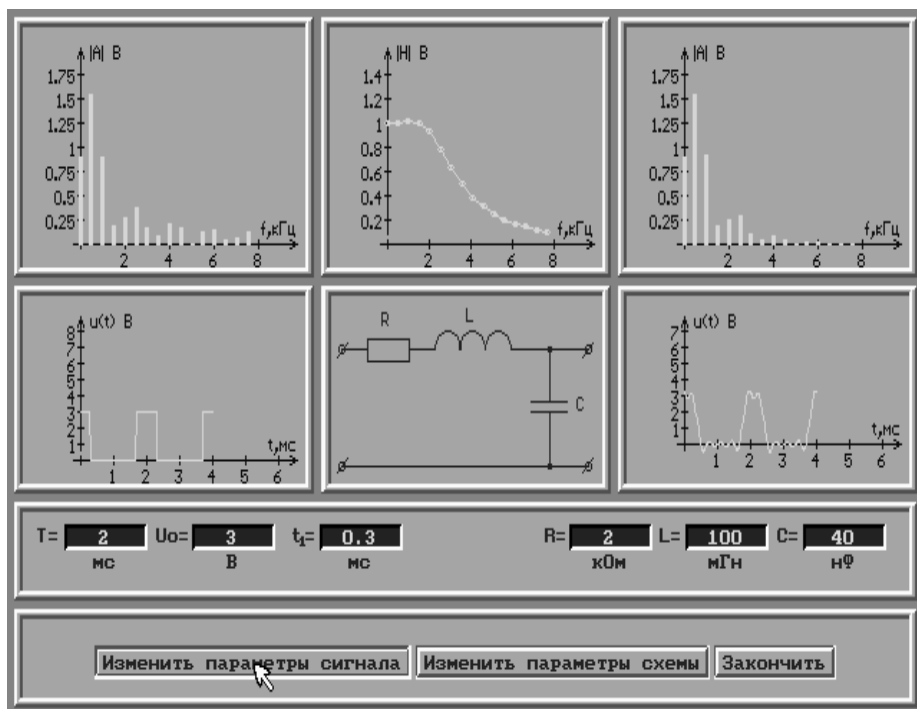


Рис. 5.6. Вид экрана ЭВМ при выполнении работы

Для исследования прохождения импульса следует выполнять указания интерфейса программы, перемещая курсор и нажимая Enter. Рекомендуется увеличивать длительность импульса до таких значений, когда форма его на выходе цепи будет похожа на прямоугольную, как на рис. 5.6. Теоретически рассчитать АЧХ цепи и спектр импульсов на выходе.

Дополнительный пункт исследования (выполняется хорошо успевающими студентами по рекомендации преподавателя)

Выбрать цепь по схеме, где L и C переставлены местами (RCL-цепь), и исследовать при тех же данных. Это будет цепь ограничивающая низкочастотные составляющие спектра, Вид экрана в этом случае приведен на рис. 5.7.

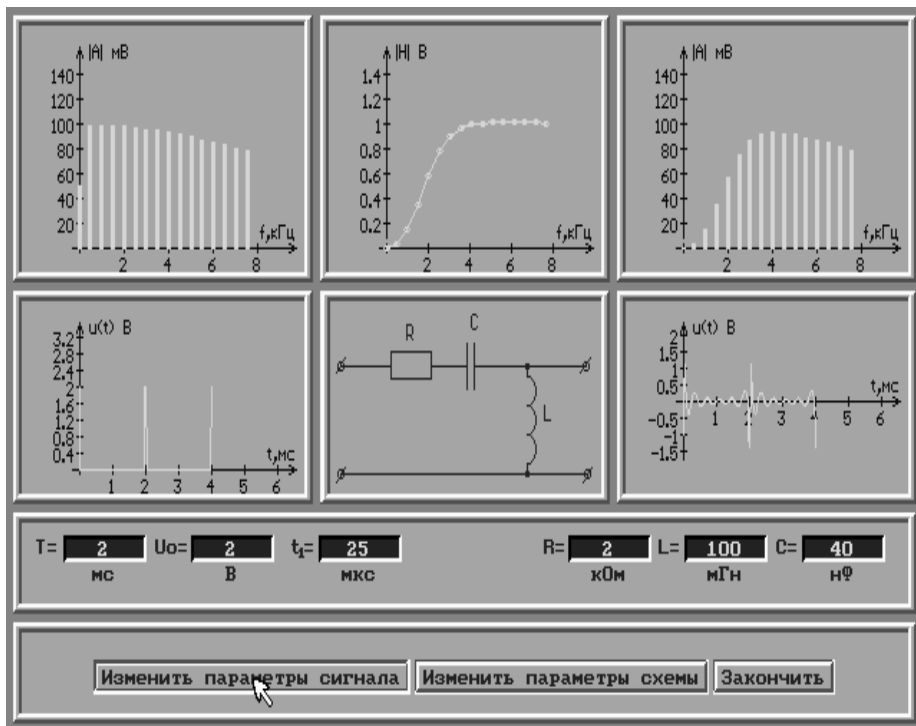


Рис. 5.7. Вид экрана ЭВМ при исследовании RCL-цепи

Для вставки в отчет рисунков с экрана ЭВМ можно использовать клавишу Print Scrin.

Аналогичные исследования можно провести с использованием программы Electronic Workbench 4 или 5 версий, как это делалось в предыдущих работах. Вид экрана при исследовании в этом случае показан на рис. 5.8.

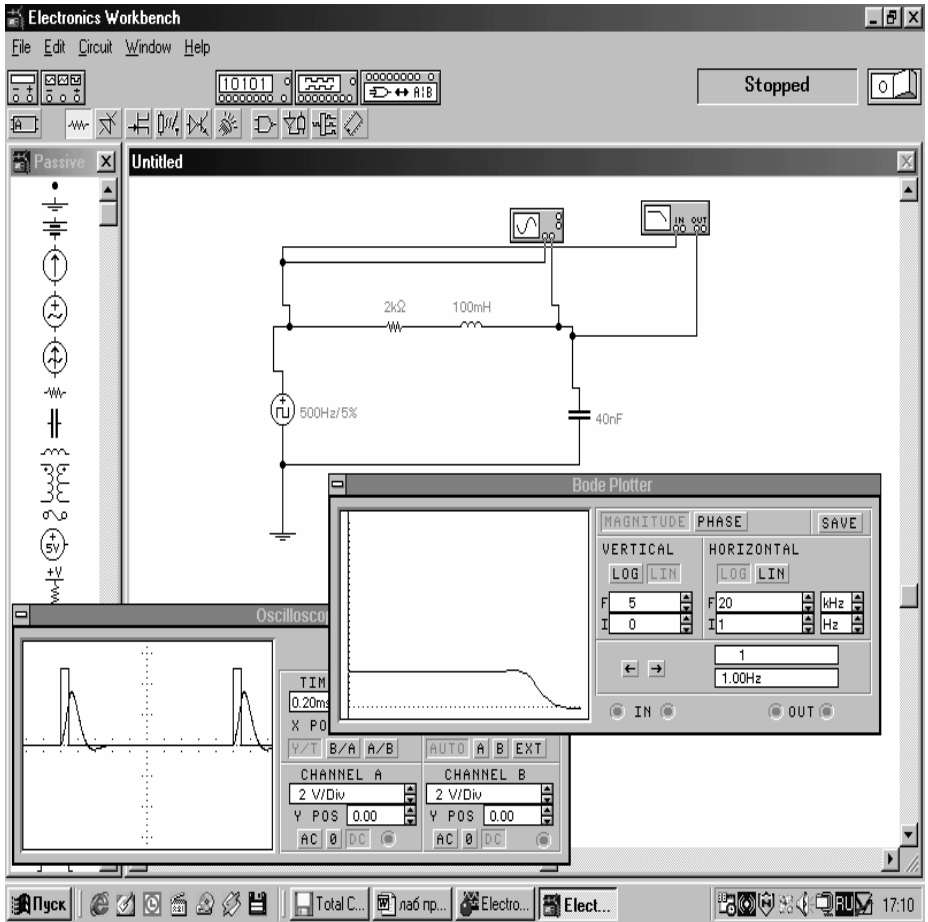


Рис. 5.8. Исследование прохождения импульса в EWB

Здесь используются генератор виртуальный прямоугольных импульсов, осциллограф и измеритель частотных характеристик (Bode Plotter).

7. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) предварительный расчет со всеми исходными данными и расчетными формулами;
- 2) схемы измерений;
- 3) результаты измерения амплитудно-частотной характеристики фильтра нижних частот, оформленные в виде таблицы 2;

- 4) графики спектров амплитуд входного и выходного сигналов, а также АЧХ фильтра нижних частот, выполненные на одном рисунке, а при выполнении на ЭВМ соответствующие графики и рисунки с экрана
- 5) осциллограммы воздействия и отклика при различных значениях длительности прямоугольного импульса, а при выполнении на ЭВМ соответствующие рисунки с экрана;
- 6) выводы о различиях в формах отклика и воздействия, а также причинах их возникновения.

8. Контрольные вопросы

1. Как определяется комплексная спектральная плотность непериодического сигнала?
2. Что называется спектром амплитуд и спектром фаз непериодического сигнала?
3. Как определяется энергия одиночного импульса?
4. Что называется шириной спектра непериодического сигнала?
5. Какова частотная зависимость модуля спектральной плотности одиночного прямоугольного импульса?
6. Как влияет на спектр амплитуд прямоугольного импульса его длительность?
7. Что называется фильтром нижних частот?
8. Каковы амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики у идеального фильтра нижних частот?
9. Как изменяется спектр одиночного импульса при прохождении через фильтр нижних частот?
10. Как изменяется форма отклика при прохождении прямоугольного импульса различной длительности через фильтр нижних частот?
11. Как рассчитать отклик цепи при импульсном воздействии?

9. Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. | М.: Гардарики, 1999, с.
2. Зевеке Г. В. и др. Основы теории цепей. -М.: Энергоатомиздат, 1989, с. 288-297.
3. Крылов В. В., Корсаков С.Я. Основы теории цепей. -М.: Высшая школа, 1990, с. 95-107.
4. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. - М.: Радио и связь. 1986, с.274 - 305.
5. Методические указания к лабораторным работам по 2-й части курса ОТЦ, ПГАТИ, Самара, 2000.
6. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2000

РАБОТА № 2-6

Исследование цепей с нелинейными резистивными элементами

1. Цель работы

Исследование вольтамперных характеристик (ВАХ), формы сигналов и их спектров в цепях с нелинейными резистивными элементами.

2. Задание на подготовку к лабораторной работе

2.1. Изучить теорию по указанной литературе и ознакомиться с методическим описанием.

2.2. Построить ВАХ диода по данным таблицы 6.1.

2.3. Построить результирующую ВАХ цепи, состоящей из диода и параллельно подключенного резистора. Выбрать величину резистора из таблицы 6.2.

2.4. Рассчитать спектральный состав тока в диоде методом 5 – ординат при напряжении $u = 0,7\cos(2\pi ft)$ В, где $f=2000$ Гц.

2.5. Рассчитать спектр тока цепи, состоящей из диода и параллельно подключенного резистора при значении сопротивления, соответствующему номеру бригады. Определить относительные величины амплитуд высших гармоник тока по отношению к амплитуде первой гармоники.

2.6. Рассчитать дифференциальное сопротивление нелинейной цепи при $U=+0,65$ В.

Таблица 6.1. Справочные данные диода

u, В	0	0.4	0.5	0.6	0.65	0.7
i, мА	0	0	0.005	0.265	1.96	14.5

Таблица 6.2. Величины резисторов для параллельной цепи

№ варианта	1,6,11	2,7,12	3,8,13	4,9,14	5,10,15
R, Ом	∞	5100	1800	330	180

3. Последовательность выполнения работы

3.1. Собрать цепь по схеме рисунка 6.1.

Регуляторы на блоках стенда установить в следующие позиции:

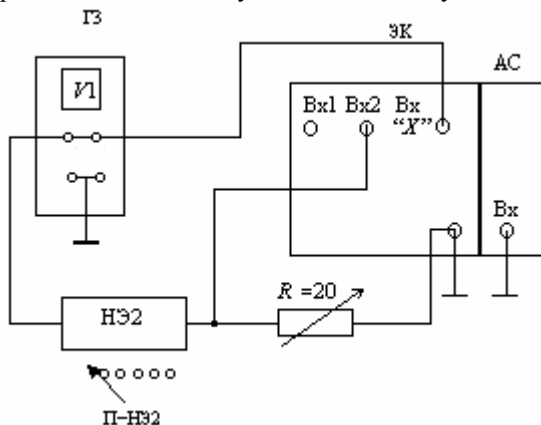


Рис. 6.1 Схема исследования нелинейного элемента

- На блоке питания включить тумблеры «Сеть», «Генератор», «Коммутатор-осциллограф»;

- На блоке Г1: тумблер «Генератор» установить в положение «Внутр.»;

- На блоке Г2: переключатель Пф – в третье положение

(≈ 2 кГц), регуляторы «Подстройка» – до отказа против часовой стрелки;

- На блоке Г3: тумблер пределов – «10 В», регулятор выходного напряжения – до отказа по часовой стрелке (максимальное выходное напряжение);

- На панели активных элементов пятипозиционный переключатель «П-НЭ2», находящийся ниже НЭ2, повернуть до отказа против часовой стрелки (первое положение);

- На блоке ЭК: тумблер «Каналы» – в среднее положение, тумблеры «Ослабление» – в положение «1:1», тумблер «1 канал» – в положение «Внутр.», тумблер «Вход X» – положение «Внеш.» (в этом случае отключается подача развертывающего пилообразного напряжения на вход усилителя горизонтального смещения осциллографа).

- Регуляторы «Усиление плавно», «Усиление X», «Расхождение» установить в такие положения, при которых на экране осциллографа оказываются две вольтамперные характеристики: линейная на 1 канале и нелинейная вида « \sim » на втором канале. Установить регуляторами электронно-

лучевой трубки линейную ВАХ в верхней части экрана, нелинейную – в нижней. Прямая наклонная линия представляет ВАХ линейного элемента. НЭ2 представляет собой параллельно соединенные полупроводниковый диод и резистор. Величины резистора изменяются ступенчато переключателем и принимает значения: ∞ , 5100 Ом, 1800 Ом, 330 Ом, 180 Ом. Для визуального наблюдения ВАХ нелинейного элемента (НЭ) с помощью осциллографа на магазине сопротивлений R_M установить сопротивление 20 Ом. Установить регуляторами ЭК размер нелинейной ВАХ примерно 3*3 см и зарисовать получившиеся изображения.

3.2. Переключатель П-НЭ2 поворачивать по часовой стрелке, при этом форма нелинейной ВАХ будет изменяться и приближаться к линейной. Зарисовать изображения в каждом из следующих 4-х положений переключателя.

3.3. Для осциллограммы, соответствующей подключению резистора по варианту предварительного расчета, записать действующее значение напряжения генератора U_T по вольтметру V1, вычислить удвоенное амплитудное значение и по нему определить масштаб напряжения по горизонтальной оси. Для этого вычислить величину напряжения, приходящуюся на одно деление сетки экрана осциллографа по горизонтали.

Определить масштаб по оси Y для тока при величине R , соответствующей варианту расчета. Для этого на вх2 осциллографа подключить напряжение от генератора, отсоединив проводник с R_M . Не изменяя усиления по вертикали, добиться регулятором напряжения генератора того, чтобы размах сигнала от генератора по вертикали получился такой же, как размер осциллограммы ВАХ по вертикали при резисторе, соответствующим варианту расчета. Далее определить величину напряжения генератора по V2, вычислить удвоенное амплитудное значение и по нему рассчитать величину тока, приходящуюся на одно деление сетки экрана по вертикали. Затем следует снова подключить к вх. 2 проводник от R_M и установить максимальное напряжение генератора.

3.4. Для исследования формы кривых тока сделать следующее. Вернуть П-НЭ2 в первое положение. Тумблер «Вход X» на ЭК перевести в положение «Внутр.», при этом внешнее напряжение от усилителя горизонтального смещения будет отключено, а развертывающее напряжение подключено. В результате на экране осциллографа окажутся изображения, соответствующие кривым напряжения на вмонтированном линейном элементе стенда (1 канал) и сопротивлением R_M (2 канал) при подключении гармонического напряжения на вход исследуемой цепи. Напряжение на R_M в свою очередь подобно по форме току через R_M и НЭ, так как они соединены последовательно. Регулятор «Развертка» удобнее установить в такое положение, при котором на экране укладывается два периода кривых напряжения. Зарисовать полученные изображения кривых для всех пяти положений П-НЭ2.

3.5. Для проверки работоспособности анализатора спектра (АС) нужно подключить выход генератора к входу АС. Далее включить тумблер питания АС, тумблер на самом блоке анализатора поставить в положение “внеш.”, на-

строить осциллограф и пронаблюдать спектр от генератора. На экране должны появиться линии, соответствующие амплитудам гармоник генератора. Причем амплитуда первой гармоники должна быть много больше амплитуд остальных гармоник. Теперь можно подключить к АС вместо проводника от генератора проводник от точки соединения НЭ2 и R_M .

В этом случае на 1 канале осциллографа появится изображения напряжения на сопротивлении R_M , которое пропорционально току через НЭ, а на втором –отрезки линий, соответствующие спектральным составляющим этого сигнала. Регуляторами усиления входа 2, делителями 1:1, 1:10, «Разверткой» установить удобный масштаб изображения спектра (первая гармоника ≈ 4 см). Зарисовать полученные осциллограммы спектра при всех положениях переключателя НЭ2. При этом рекомендуется поддерживать уровень первой гармоники постоянным при всех положениях П-НЭ2 с помощью регулятора усиления ЭК по входу 2. Выключить тумблер питания анализатора спектра.

4. Обработка результатов исследований

4.1. Объяснить вид и ход ВАХ НЭ при разных положениях переключателя (разных шунтирующих сопротивлениях)

4.2. Объяснить ход кривых тока НЭ при разных шунтирующих сопротивлениях.

4.3. Объяснить характер изменения спектра тока НЭ.

4.4. По осциллограмме ВАХ нелинейной цепи с резистором, соответствующим варианту предварительного расчета, определить дифференциальные сопротивления ветвей ВАХ при $U=\pm 0.65$ В и сравнить с данными полученными предварительным расчетом.

4.5. По линиям спектральных составляющих для своего варианта определить относительные значения амплитуд высших гармоник по отношению к первой и сравнить с данными теоретического расчета.

7. Содержание отчета

5.1. Схема исследования НЭ.

5.2. Изображение снятых осциллограмм.

5.3. Результаты предварительного расчета.

5.4. Данные, полученные при обработке результатов исследований.

5.5. Оценка экспериментального материала и выводы по проделанной работе.

8. Выполнение работы 2-6 на ЭВМ

Для выполнения работы на ЭВМ следует запустить программу **BOOK 3.0** [5] из директории **ТЭЦ-2 (TEZ-2)** по файлу **menu.exe** или ярлыку программы и войти в раздел “**нелинейные резистивные элементы**”. Затем войти в подраздел “**демонстрация**” и просмотреть аппроксимацию различных характеристик степенными и кусочно-линейными способами.

- Войти в подраздел “самообучение”, выбрать характеристику диодного типа и исследовать степенную (2 и 3 степени) и кусочно-линейную аппроксимации, а также форму тока и его спектр ($U_0=4$ В, $U_m=2$ В, 4 В), зарисовывая получающиеся графики.

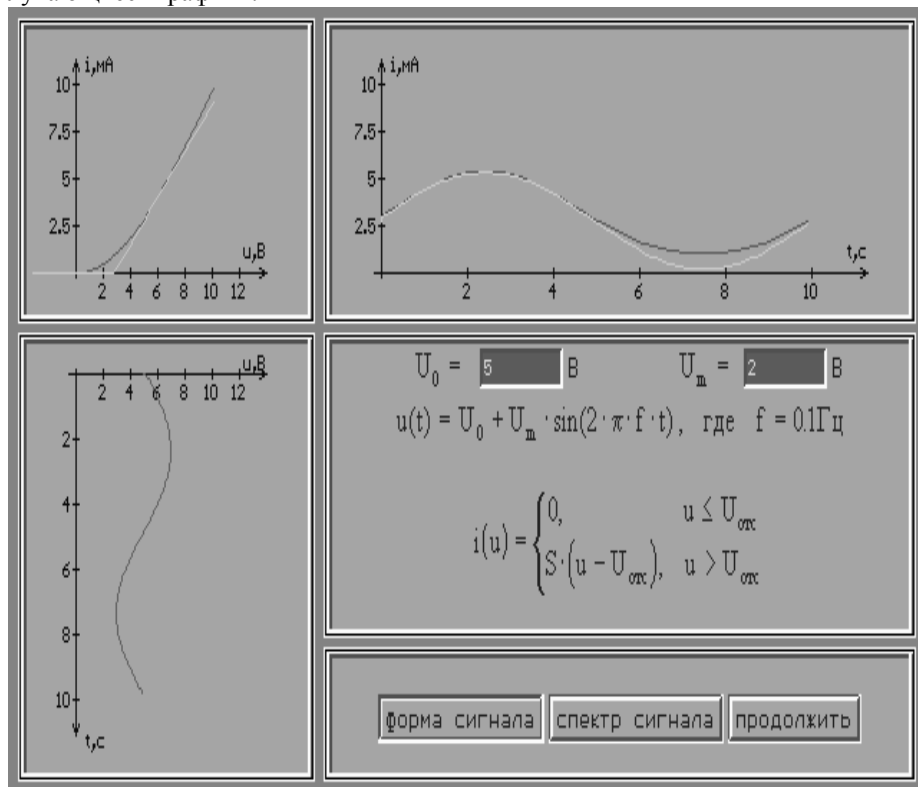


Рис.6.1а Вид экрана ЭВМ в BOOK 3.0

-Выбрать характеристику туннельного диода и исследовать степенную аппроксимацию (3 степень), а также форму тока и его спектр ($U_0=4$ В, $U_m=2$ В, 4 В), зарисовывая получающиеся графики.

- Выбрать характеристику транзисторного типа и исследовать степенную (3 степень) и кусочно-линейную (двухстороннюю) аппроксимации, а также форму тока и его спектр ($U_0=4$ В, $U_m=2$ В, 4 В), зарисовывая получающиеся графики.

- Проанализировать результаты исследований, выйти из программы (опции “нет, выход” и клавиши F10 или Esc) и оформить отчет. Пример вида экрана ЭВМ при кусочно-линейной аппроксимации приведен на рис. 6.1а

9. Основные теоретические положения

Нелинейными электрическими цепями называются цепи, описываемые нелинейными уравнениями. Нелинейные электрические цепи обязательно содержат нелинейные элементы. Свойства и характеристики таких цепей зависят от величин и направлений токов в элементах цепи и напряжений на них.

Нелинейными резистивными элементами считаются такие элементы, в которых ток и напряжение связаны нелинейной зависимостью, называемой вольт-амперной характеристикой. Такие элементы характеризуются величинами статических и дифференциальных сопротивлений в каждой точке ВАХ:

$$R_{ст.} = u/i, R_{диф} = du/di.$$

Например, полупроводниковый диод при низких частотах можно считать нелинейным резистором, у которого при отрицательных (обратных) значениях напряжений сопротивление очень велико, а при положительных (прямых) значениях напряжений сопротивление мало.

Для расчета цепей с нелинейными резистивными элементами используются графо-аналитические методы расчетов токов, напряжений и их спектров. Так ВАХ аппроксимируется чаще всего степенным полиномом n -ой степени, а в случае диода - порой кусочно-экспоненциальной или кусочно-линейной функцией.

При последовательном соединении резистора и диода, результирующая ВАХ получается суммированием напряжений отдельных элементов при одном и том же токе. Пример последовательного соединения НЭ и линейного приве-

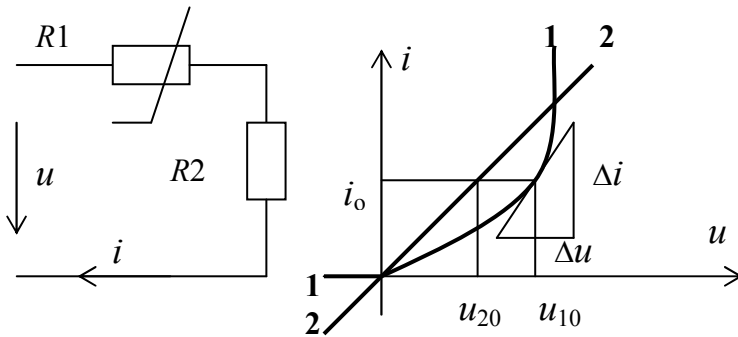


Рис. 6. 2. Последовательное соединение нелинейного и линейного резисторов и их ВАХ-ки

ден на рис. 6.2.

На этом рисунке так же приведены ВАХ НЭ (1) и линейного резистора (2). При заданном токе i_0 общее напряжение $u = u_{10} + u_{20}$. Здесь также показано, что дифференциальное сопротивление НЭ можно определить через прираще-

ния напряжения и тока по формуле $R \text{d}i/\text{d}t = \Delta u/\Delta i$ и оно сильно зависит от выбора точки определения сопротивления.

При параллельном соединении ВАХ определяется аналогично, только суммированием токов отдельных элементов при одном и том же напряжении. Для визуального наблюдения ВАХ используется осциллограф, на вход X которого подается гармоническое напряжение с нелинейной цепи, а на вход Y - напряжение пропорциональное току в нелинейной цепи, снимаемое с резистора $R_M = 20 \text{ Ом}$

(рис. 6.1). При этом развертка по горизонтали соответствует напряжению на нелинейной цепи, а по вертикали - напряжению на R_M , которое пропорционально току. Это и позволяет получить зависимость $i=f(u)$, то есть ВАХ.

Для расчета спектрального состава тока в нелинейных цепях применяется степенная аппроксимация ВАХ с использованием тригонометрических преобразований или, что более просто, метод нескольких ординат. Так метод 5-ти ординат требует наличия ВАХ и графика входного напряжения. По указанным графикам определяются 5 ординат тока при $t = 0; T/6; T/4; T/3; T/2$, где T - это период напряжения. При этом входное напряжение следует взять равным: $u = 0,7 \cos(2\pi ft)$ В, а ток представить в виде

$$i = I_0 + I_{1m} \cos(2\pi ft) + I_{2m} \cos(2\pi 2ft) + I_{3m} \cos(2\pi 3ft) + I_{4m} \cos(2\pi 4ft) \text{ А} .$$

Составив систему уравнений для различных t , следует вычислить постоянную составляющую тока I_0 и амплитуды гармоник тока I_{km} . Можно воспользоваться готовыми формулами из [1].

$$I_0 = (i_{\max} + i_{\min} + 2(i_1 + i_2))/6, \quad I_{1m} = (i_{\max} - i_{\min} + i_1 - i_2)/3, \\ I_{2m} = (i_{\max} + i_{\min} - 2i_0)/4, \quad I_{3m} = (i_{\max} - i_{\min} - 2(i_1 - i_2))/6, \\ I_{4m} = (i_{\max} + i_{\min} - 4(i_1 + i_2) - 6i_0)/12$$

Следует иметь в виду, что для диодной характеристики при отсутствии постоянной составляющей в подключаемом напряжении, $i_{\min} = i_2 = i_0 = 0$. Примерный вид графиков напряжения и тока нелинейного элемента (диода) при $2\pi f = \omega = 10 \text{ p/c}$ приведены на рис. 6.3. Для выделения спектральных составляющих можно использовать колебательный контур, настроенный в резонанс с частотой выделяемой гармоники. При высокой добротности и соответственно узкой полосе пропускания контур будет пропускать практически только резонансную частоту. Этого можно добиться, выбрав характеристическое сопротивление контура значительно больше активного сопротивления. Графики этих составляющих приведены на рис. 6. 4 и 5.

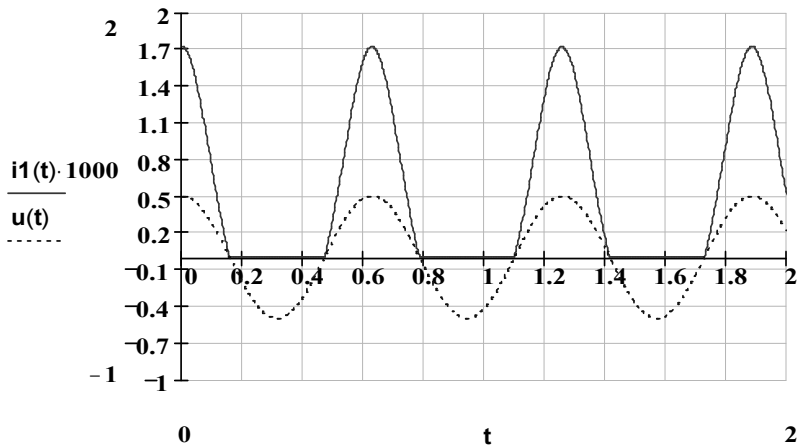


Рис.6.3. Графики напряжения и тока нелинейного элемента (диода)

**Спектральные составляющие тока
нелинейного элемента**

A

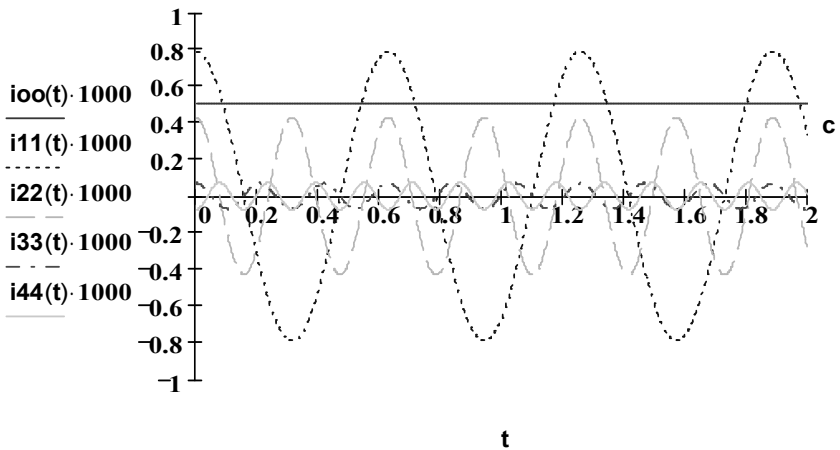


Рис.6.4. Спектральные составляющие тока диода.

Спектр амплитуд тока нелинейного элемента

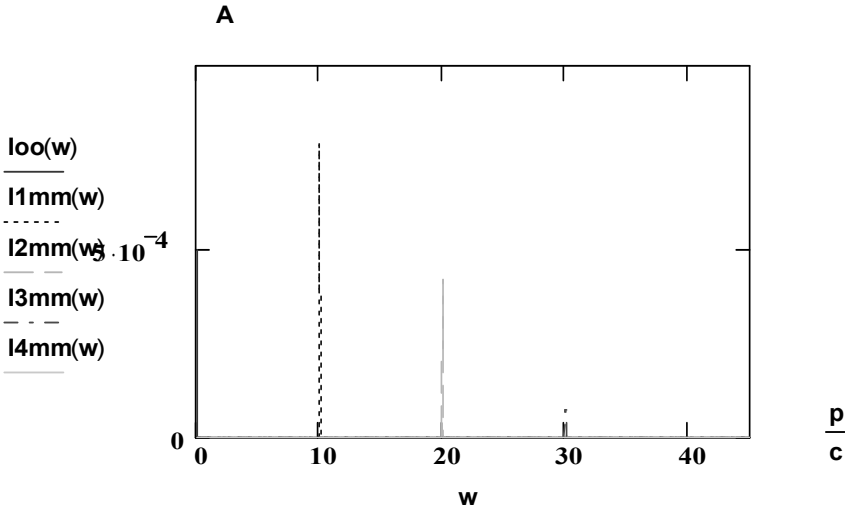


Рис. 6.5. Спектр амплитуд тока диода

10. Контрольные вопросы

1. Что такое нелинейные резистивные элементы?
2. Как определяются величины статических и дифференциальных сопротивлений нелинейных элементов по ВАХ, как их величины зависят от выбора расчетной точки?
3. Что такое аппроксимация ВАХ, какие виды аппроксимации используют для диодов?
4. Как можно визуально наблюдать ВАХ?
5. Какой вид имеет ВАХ диода и последовательно включенного резистора?
6. Как изменяется результирующая ВАХ при увеличении последовательно включенного сопротивления?
7. Какой вид имеет ВАХ диода и параллельно включенного резистора?
8. Как изменяется результирующая ВАХ при уменьшении параллельно включенного сопротивления?
9. Как определить форму кривой тока нелинейного элемента при гармоническом напряжении?
10. Что понимают под спектром периодического сигнала?
11. Как рассчитать спектр амплитуд тока методом 5-ти ординат?
12. Как можно определить экспериментально спектральный состав электрического сигнала?

11. Литература

1. Попов В.П. Основы теории цепей. -М.: Высшая школа, 2000, с. 306-351.

2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. –М.: Гардарики, 1999, с. 404-422,449-527.
3. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. –М.: Радио и связь, 1982, с. 36-70.
4. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. –М.: Энергоатомиздат,1989, с.186-432.
5. Бакалов В.П., Крук Б.И., Журавлева О.Б. Теория электрических цепей. Новосибирск. СибГАТИ, 1998, с. 134-153.
6. Методические указания к лабораторным работам по 2-й части курса ОТЦ, ПГАТИ, Самара, 2000.
7. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2000

РАБОТА № 2-7

Исследование RC - генератора синусоидальных колебаний на операционном усилителе

1. Цель работы

Целью работы является изучение принципа действия и исследование процесса самовозбуждения автогенератора на операционном усилителе (ОУ) с RC -цепью обратной связи.

2. Задание на подготовку к лабораторной работе

- 2.1. Ознакомиться с описанием данной работы.
- 2.2. Изучить теорию по указанной литературе.
- 2.3. Выполнить предварительный расчет.

3. Задание на предварительный расчет

- 3.1. Для генератора, показанного на рис. 7.1, рассчитать частоту генерации $f_{г}$, выбрав величины резисторов и емкостей из таблицы 7.1.
- 3.2. Для усилителя генератора, схема которого показана на рис. 7.2, рассчитать величину резистора $R3$, регулирующего коэффициент усиления, из условия самовозбуждения генератора. При этом выбрать значение $R4 = 1$ кОм.
- 3.3. Для схемы цепи обратной связи (ЦОС), показанной на рисунке 7.3, рассчитать амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики. Расчеты произвести на частоте генерации $f_{г}$, на трех частотах больше $f_{г}$ и меньше $f_{г}$ с шагом Δf и построить графики этих характеристик.

Таблица 7.1. Исходные данные для расчета

N варианта	R1, R2, кОм	C1, C2, нФ	Δf , кГц
1	5,305	30	0,2
2	2,65	30	0,3
3	1,77	30	0,5
4	1,32	30	0,5
5	1,06	30	1,0
6	0,865	30	1,0
7	0,76	30	1,0
8	0,66	30	1,0
9	0,59	30	1,0
10	0,53	30	1,0
11	2,8	4,7	1,0
12	2,546	4,7	1,0

4. Последовательность выполнения работы.

4.1. Собрать схему рисунка 7.1, используя ОУ на плате активных элементов.

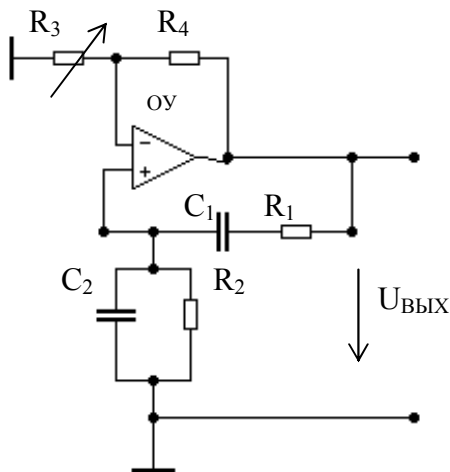


Рис. 7.1. Схема генератора

В качестве резистора **R3** использовать магазин сопротивлений, для цепи обратной связи (ЦОС) – четырехполюсник с **RC**-элементами, собранный внутри макета рядом с ОУ, для **R4** – резистор 1кОм, подключенный одним выводом к ОУ. При сборке можно использовать любое гнездо, маркированное как корпус. Выход **RC**-генератора подключить к “вх. 2” осциллографа.

4.2. Включить на блоке питания тумблеры “сеть”, “генератор”, “коммутатор - осциллограф”, “плата элементов” и убедиться в работоспособности этих блоков. Тумблер “канал” на блоке ЭК поставить в положение

“вх.2”, тумблеры на блоках Г1, ЭК – в положение “внутр.”.

4.3. Изменяя величину сопротивления R3, установить на магазине сопротивлений минимальное значение, при котором возникает генерация (появляются колебания на экране осциллографа). Записать величину этого сопротивления.

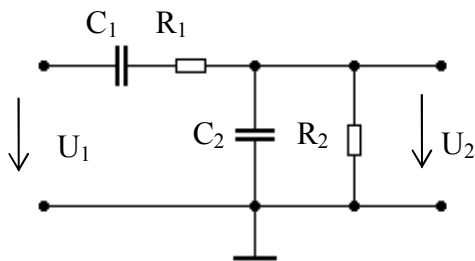


Рис. 7.3. Схема ЦОС

стойчивого изображения синусоиды на экране и зарисовать ее. Стрелка прибора на Г1 покажет при этом частоту генерации.

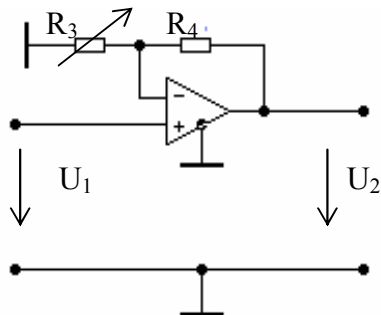


Рис. 7.2. Схема усилителя

при минимальном значении R_3 .

4.6. Собрать схему для измерения АЧХ и ФЧХ ЦОС (рис. 7.3). Для этого подключить входной зажим ЦОС к выходу генератора на блоке Г3 и к гнезду “изм.” фазометра, выходной – к вольтметру V2 и к гнезду “опор.” фазометра. Снять показания приборов на расчетных частотах. Далее определить экспериментально частоту, на которой фазометр покажет минимальное значение угла φ .

Примечание: Выполнение данной работы на ЭВМ описано в [6]. Можно эту работу выполнять на ЭВМ и по данным методическим указаниям, “собирая” схемы измерений с использованием пакета Electronics Workbench по схеме рис.7.4..

С помощью стрелочного указателя частоты на блоке Г1 определить частоту генерации. Для этого изменяя плавно частоту собственного генератора стенда вблизи расчетной частоты, добиться устойчивого изображения синусоиды на экране и зарисовать ее. Стрелка прибора на Г1 покажет при этом частоту генерации.

4.4. Подключить вольтметр V2 к выходу ОУ и измерить величину действующего значения напряжения на выходе, включив тумблеры питания. V2 и V3– φ .

4.5. Отключить цепь обратной связи от ОУ. Подключить вход + ОУ к выходу генератора на блоке Г3. Установить напряжение генератора 1 В. Измерить коэффициент усиления усилителя генератора K (рисунок 7.2)

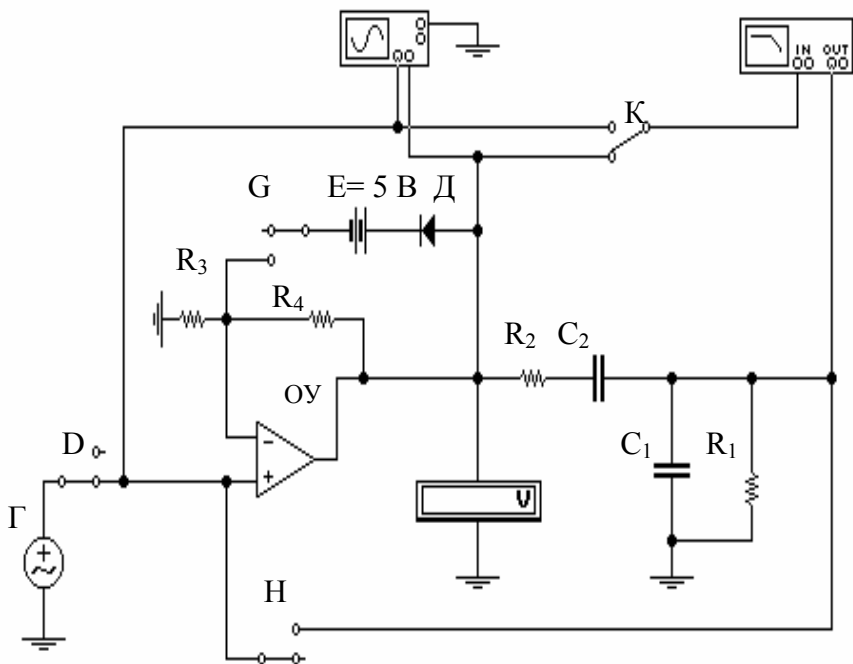


Рис. 7.4. Схема исследования генератора (EWB-4)

Здесь используется для исследований внешний генератор гармонических колебаний Γ , операционный усилитель ОУ, для улучшения формы колебаний диод Д и источник $E=5\text{ В}$, осциллограф, вольтметр и измеритель частотных характеристик. Также присутствуют ключи, отмеченные латинскими буквами, управляющими их срабатыванием и позволяющие проводить измерения отдельно усилителя, цепи обратной связи и самого генератора.

5. Содержание отчета

- 1) Исходные данные и результаты предварительного расчета.
- 2) Схемы измерений и данные, полученные в результате эксперимента.
- 3) Графики рассчитанных и измеренных характеристик.

8. Основные теоретические положения

Как известно, генераторы являются преобразователями энергии постоянного напряжения (тока) в энергию колебаний различной формы. Чтобы генера-

тор выполнял свою функцию, цепь генератора должна относиться к типу неустойчивых электрических цепей (самовозбуждающихся).

RC-генератор синусоидальных колебаний, исследуемый в данной работе (рис. 7.1), состоит из усилителя напряжения, выполненного по схеме рис. 7.2 на ОУ, и цепи обратной связи рис. 7.3, содержащей RC-элементы.

Коэффициент усиления по напряжению усилителя генератора для случая идеального ОУ определяется формулой:

$$K = (R3+R4)/R3.$$

Для реального ОУ следует учитывать входные и выходные сопротивления, емкости и конечность коэффициента усиления по схеме замещения конкретного типа ОУ.

Коэффициент передачи ЦОС рис. 7.3 определяется выражением: $\beta(j\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$. Отсюда можно получить форму-

$$\beta(j\omega) = \frac{1}{1 + C_2 / C_1 + R_1 / R_2 + j(\omega R_1 C_2 - 1 / \omega R_2 C_1)}.$$

Общий коэффициент передачи автоколебательной цепи с учетом обратной связи равен: $K_{OC} = \frac{K}{1 - K\beta(j\omega)}$.

Так как усилитель вида рисунка 7.2 не изменяет фазу сигнала, а для соблюдения условия баланса фаз и амплитуд требуется, чтобы на частоте генерации $K\beta(j\omega) = 1$, то фазовый сдвиг ЦОС должен быть равен 0° . Исходя из этого, мнимую составляющую знаменателя $\beta(j\omega)$ нужно приравнять нулю. В этом случае частота генерации определяется формулой:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1 \cdot R2 \cdot C1 \cdot C2}}.$$

Из условия баланса амплитуд следует, что

$$K \cdot \beta(2\pi f_r) = 1.$$

При $R1=R2$ и $C1=C2$, $\beta=1/3$ и $K=3$.

Это соотношение используется для расчета величины сопротивления $R3$. Необходимо отметить, что практически для возникновения колебаний коэффициент усиления должен несколько превышать расчетное значение. При этом корни характеристического уравнения, описывающего цепь с обратной связью, являются комплексно-сопряженными с положительной вещественной частью. В этом случае амплитуда колебаний нарастает с уровня шумовых флуктуаций до уровня примерно 0,8-0,9 от напряжения питания ОУ ($U_{пит} = \pm 12$ В). При больших амплитудах сказываются нелинейные эффекты в ОУ и вели-

чина K уменьшается. Из-за этого амплитуда колебания ограничивается, а форма сигнала в RC -генераторах искажается и является не чисто гармонической.

Расчет АЧХ - $\beta(\omega)$ и ФЧХ - $\varphi(\omega)$ цепи обратной связи можно выполнить в программе **Mathcad**, аналогично как в работе 2-4, используя операции вычисления модуля аргумента комплексной функции. Пример расчета приведен ниже, а график на рисунке 7.5

$$R := 5000 \qquad C := 30 \cdot 10^{-9}$$

$$\beta(f) := \frac{1}{\sqrt{9 + \left(2\pi \cdot f \cdot R \cdot C - \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R \cdot C} \right)^2}}$$

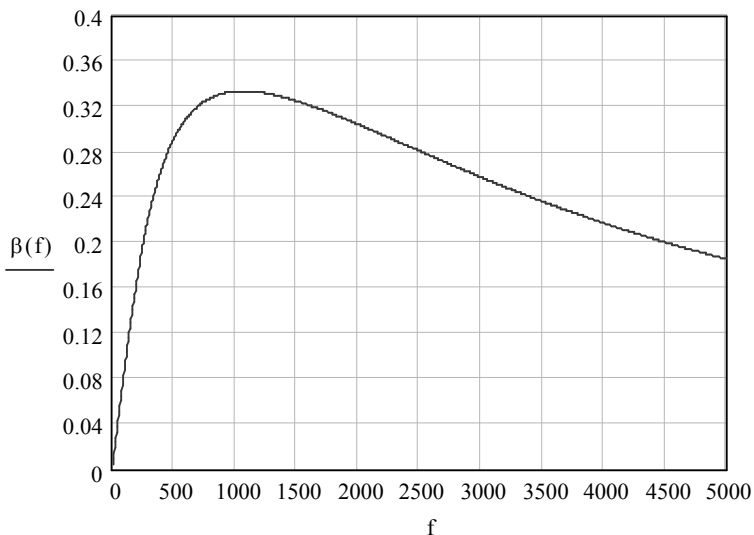


Рис. 7.5. График АЧХ цепи обратной связи

9. Контрольные вопросы

1. Что такое устойчивость и неустойчивость электрической цепи?
2. Какие существуют критерии устойчивости?
3. Что такое положительная и отрицательная обратная связи?
4. Как определяется неустойчивость цепи по критерию Найквиста?
5. Как получить формулу коэффициента усиления усилителя RC -генератора при идеальном ОУ?

6. Как оценить влияние параметров ОУ на коэффициент передачи усилителя?
7. В чем суть баланса амплитуд и фаз для RC -генератора на ОУ?
8. Как получить формулу частоты генерации для RC -генератора на ОУ?
9. Как происходит самовозбуждение RC -генератора с точки зрения теории переходных процессов?
10. В чем преимущества и недостатки RC -генераторов?
11. Как получить формулу коэффициента передачи ЦОС рис. 7.3?
12. Что такое LC -генераторы и как они работают?

8. Литература

- 1.1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Гардарики, 1999, с.555-565.
- 1.2. Бакалов В.П., Крук Б.И., Журавлева О.Б. Теории электрических цепей. СибГАТИ, Новосибирск, 1998, с. 154-179.
- 1.3. Андреев В.С. Теория нелинейных цепей. - М.: Радио и связь, 1982, с. 114-135,161-188.
- 1.4. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники. – М.: Радио и связь, 1989, с.296-313.
- 1.5. Белецкий А.Ф. Теория линейных электрических цепей. - М.;Радио и связь, 1986, с. 79-82.
- 1.6. Методические указания к лабораторным работам по курсу ТЭЦ “Исследование нелинейных цепей с помощью пакета Electronics Workbench”, кафедра ТЭЦ ПГАТИ, составители: к.т.н., доц. Михайлов В.И., к.т.н., доц. Алексеев А.П., Самара, 2000.
- 1.7. Методические указания к лабораторным работам по 2-й части курса ОТЦ, ПГАТИ, Самара, 2000.
10. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. -М.: Радио и связь. 2000