

Федеральное агентство по науке и образованию Российской Федерации
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ГОУ ВПО и АмГУ)

ИЗУЧЕНИЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И СХЕМ

Лабораторный практикум для студентов специальности 010701 –
физика

Благовещенск 2010

Изучение радиотехнических цепей и схем. Копылова И.Б.
Благовещенск: Амурский государственный университет. 2010. - 62 с.

Составитель:

Копылова И.Б.

Содержит описание 6 лабораторных работ по дисциплине «Основы радиоэлектроники».

Для студентов специализации физика.

Рецензент: доктор физ.-мат. наук, профессор Барышников С.В.

Амурский государственный университет, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	4
2. Определение основных параметров интегрирующих и дифференцирующих цепей	9
3. Определение частотных характеристик последовательного колебательного контура.	19
4. Определение частотных характеристик параллельного колебательного контура.	27
5. Анализ работы фильтров.	32
6. Изучение работы транзисторного усилителя с различной нагрузкой.	42
7. Изучение работы цифровых генераторов.	48
8. Литература	62

ВВЕДЕНИЕ

Для выполнения лабораторного практикума используется универсальный лабораторный стенд «Сигнал-1». Стенд имеет две платы: нижнюю и верхнюю. Нижняя плата содержит блок питания, вспомогательные усилители, аттенюаторы. Верхняя плата - рабочая, содержащая универсальный транзисторный усилитель, сумматор, нелинейные звенья, фильтр нижних частот Баттерворта, вспомогательный источник питания. Внешний вид лицевой панели стенда показан на рис.1.

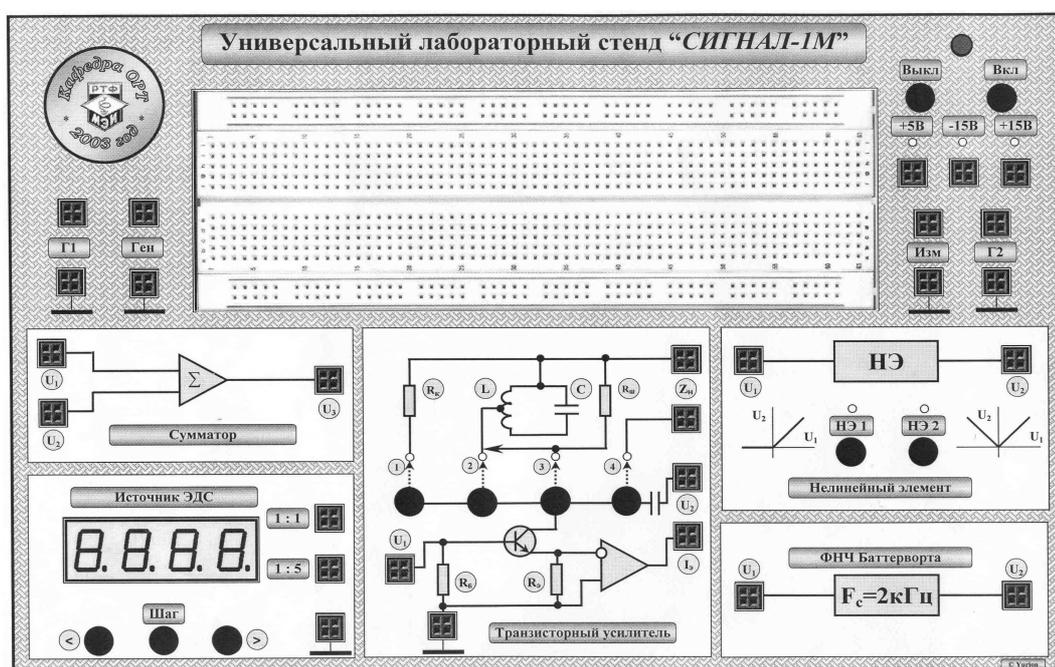


Рисунок 1.

На верхней панели расположено наборное поле фирмы Wisner Enterprise Co, которое содержит 800 гнезд, которые соединены группами по 5 штук вертикально, в нижних рядах горизонтально (рис.2).

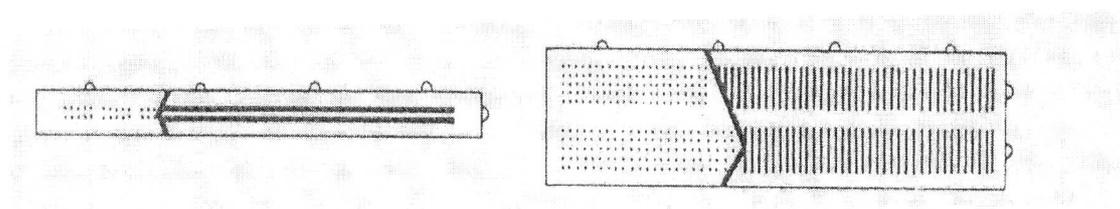


Рисунок 2.

Краткие характеристики стенда

Функциональные возможности.

Функциональные возможности стенда определяются в основном прилагаемым программным обеспечением, которое может неограниченно наращиваться и развиваться. В настоящее время программное обеспечение позволяет реализовать следующие функции.

Формирование радиотехнических сигналов.

Программное обеспечение комплекса позволяет формировать радиотехнические сигналы несколькими способами:

– выбор сигналов с помощью меню, которое включает в себя сумму гармонических сигналов с произвольными частотами, амплитудами и фазами (до 5 гармоник), модулированные сигналы, видеоимпульсы различной формы;

– формирование импульсов по узловым точкам, координаты которых задаются численно. Таким методом формируются видеоимпульсы прямоугольной, треугольной, трапециевидной и любой другой формы, описываемой отрезками прямых линий, а также радиоимпульсы с произвольной частотой заполнения и огибающей из отрезков прямых линий;

– формирование псевдослучайных сигналов осуществляется с помощью меню. Можно формировать «белый» шум с шириной спектра 2 МГц и заданным законом распределения (нормальным, равномерным, релеевским и райсовским) и нормальный случайный процесс с произвольной корреляционной функцией.

Измерение характеристик сигналов.

Программное обеспечение позволяет осуществлять следующие действия:

- получение осциллограмм с возможностью измерения напряжений и временных интервалов с помощью маркеров;
- получение спектрограмм с возможностью определения амплитуд и частот гармоник;
- для случайных процессов – наблюдение реализаций, измерение плотностей вероятности, интегральных законов распределения, корреляционных функций и энергетических спектров.

К стенду в комплекте имеются сменные детали и соединительные провода.

Описание основных схем стенда

1. Универсальный транзисторный усилитель.

Упрощенная схема усилителя представлена на верхней панели стенда. С помощью кнопочного переключателя к коллекторной цепи можно подключить различные виды нагрузки. В положении переключателя (1) нагрузкой служит резистор $R_1=10$ кОм; в положении (2) – колебательный контур с резонансной частотой 100 кГц и резонансным сопротивлением около 10 кОм; в положении переключателя (3) нагрузкой усилителя является тот же колебательный контур, зашунтированный резистором $R_2=10$ кОм; в положении переключателя (4) к коллекторной цепи подключается гнездо Z_n , к которому, в свою очередь, может быть подключена произвольная нагрузка, собираемая, например, на наборном поле. Индикация подключенной нагрузки осуществляется с помощью светодиодов. Напряжение питания усилителя – 8 В. Тип транзистора и режим его работы подобраны таким образом, чтобы можно было исследовать как линейный, так и нелинейный режимы работы усилителя.

2. Сумматор

Суммируемые сигналы подаются на гнезда U_1 и U_2 . В частности на один из выходов сумматора может подаваться исследуемый сигнал, а на

другой вход – напряжение смещения; сумма этих напряжений с выхода сумматора U_3 может подаваться на вход U_1 транзисторного усилителя. Входное сопротивление сумматора – 100 кОм, выходное сопротивление – 2 кОм.

3. Нелинейный элемент.

Нелинейный элемент представляет собой нелинейный безынерционный четырехполюсник с проходными характеристиками двух видов: типа «однополупериодный выпрямитель» и типа «двухполупериодный выпрямитель». Коммутация характеристик осуществляется с помощью кнопок.

4. Фильтр нижних частот.

На стенде смонтирован фильтр нижних частот Баттерворта 6-го порядка с частотой среза 2 кГц. Ослабление на частоте 4 кГц – не хуже 30 дБ. Фильтр собран на операционных усилителях с напряжением питания +15 В, которое включается кнопкой «Вкл» на правой верхней части лицевой панели.

5. Источник ЭДС.

Источник ЭДС используется для подачи постоянного напряжения смещения на исследуемое устройство. Величина напряжения регулируется с помощью кнопки и может измениться от –10 до +10 В с шагом 0,5 В или 0,01 В при снятии напряжения с гнезда «1:1». Величина шага изменяется нажатием кнопки «Шаг». При снятии с гнезда «1:5» значения напряжения в 5 раз меньше.

6. Вспомогательные элементы и гнезда на верхней панели стенда.

Исследуемый сигнал формируется интерфейсной платой, встроенной в компьютер. Через вспомогательный усилитель и мощный повторитель,

выходное сопротивление которого равно 5 Ом, он подается на гнезда «Ген». С этих гнезд сигнал с помощью внешних соединительных проводников подается на исследуемое устройство.

Гнезда «Изм» соединены с высокоомным входом усилителя, с которого исследуемый сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь и далее – в компьютер.

Гнезда «+5В», «-15В», «+15В» служат для питания исследуемых устройств, собираемых на наборном поле. Все встроенные узлы стенда питаются от внутреннего источника питания, напряжение на них подается при горящих индикаторных светодиодах «-15В», «+15В».

Гнезда «Г1» и «Г2» соединены с коаксиальными разъемами, расположенными на задней стенке стенда. Они предназначены для подключения внешних измерительных приборов.

УКАЗАНИЯ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ

1. К работе на стенде допускаются лица, ознакомленные с его устройством, принципом действия и мерами безопасности в соответствии с требованиями, приведенными в настоящем разделе.

2. Наладочные работы, осмотры и ремонт производить только после отключения стенда от сети питания с помощью сетевой вилки.

3. Запрещается во время работы отключать кабели, соединенные между собой отдельные составные части стенда.

4. Запрещается работа на стенде при снятом кожухе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

Оборудование: Лабораторный стенд «Сигнал - 1», компьютер.
Навесные элементы: конденсаторы, катушка индуктивности, резисторы.

Цель работы:

1. Построить АЧХ для дифференцирующей и интегрирующей цепи.
2. Определить вид сигнала на выходе цепей и определить коэффициенты передачи.
3. Провести анализ влияния постоянных времени дифференцирующей и интегрирующей цепи на вид ФЧХ.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Дифференцирующие цепи.

Для формирования коротких импульсов служат дифференцирующие цепи – линейные четырехполюсники, у которых выходное напряжение приблизительно пропорционально производной входного напряжения по времени:

$$u_{\text{вых}} = k \frac{du_{\text{вх}}}{dt}, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

На рис.1 приведены схемы простейших дифференцирующих RC - (рис.1а) и LC (рис.1б) цепей.

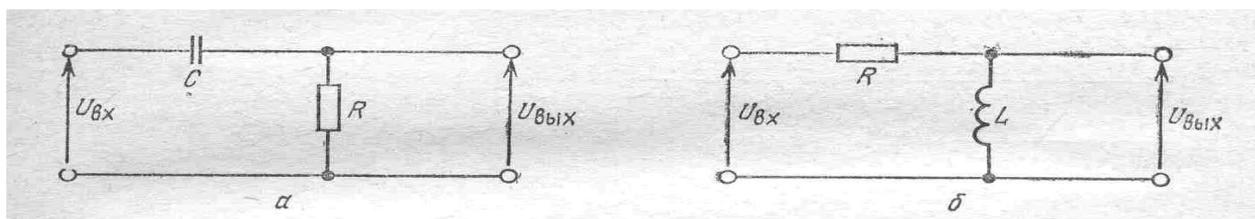


Рисунок 1.

На рисунке 2 изображены диаграммы, поясняющие их работу при воздействии единичного импульса напряжения (на примере RC -цепи). В момент времени t_1 напряжение на конденсаторе равно нулю, следовательно, в момент времени t_1+0 (сразу после положительного перепада входного напряжения $U_{вх}$) выходное напряжение $U_{вых}(t_1+0)=U_{вхmax}$. Затем конденсатор заряжается согласно выражению:

$$u_c = U_{вхm} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (2),$$

а выходное напряжение изменяется по закону:

$$u_c = U_{вхm} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3)$$

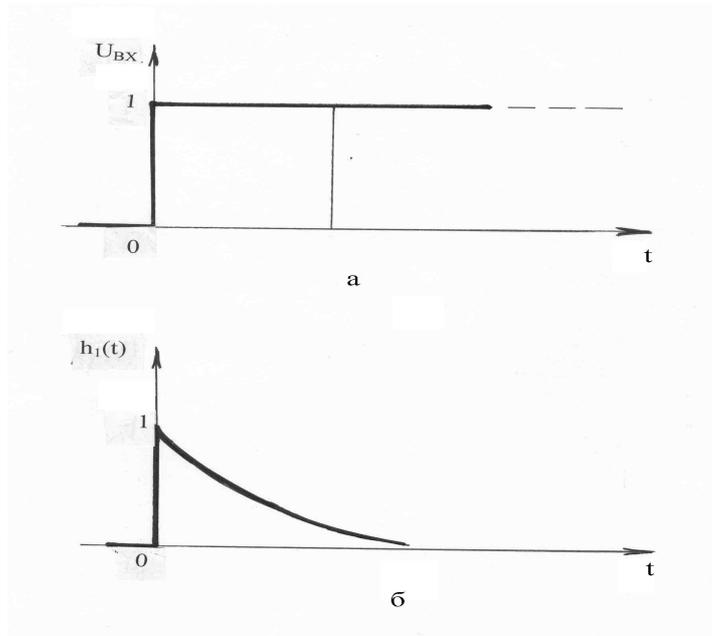


Рисунок 2.

Переходные процессы можно считать закончившимися при $t=3RC$, поэтому при $t=(t_2 - t_1) \gg 3RC$ на выходе появляется экспоненциальный импульс. В момент времени t_2 (отрицательный перепад напряжения $U_{вх}$) процессы аналогичны и на выходе появляется отрицательный импульс. Для уменьшения длительности выходных импульсов следует уменьшить постоянную времени цепи $\tau=RC$. Можно показать, что при этом повышается и точность дифференцирования входного напряжения.

Коэффициент передачи:

$$H(f) = K = \frac{U_{\text{Вых}}}{U_{\text{Вх}}} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC}} \quad (4)$$

$$\text{или } H(f) = K \frac{1}{1 + \frac{\omega_H}{j\omega}} = \frac{1}{1 + \frac{f_H}{jf}} \quad (5),$$

$$\text{где } \omega_H = 2\pi f_H = \frac{1}{RC}$$

RC – называют постоянной времени цепи.

При частоте

$$f = f_H = \frac{1}{2\pi RC}$$

активное и реактивное сопротивления равны $R = X_C = \frac{1}{\omega C}$, что

соответствует резонансу в цепи.

Модуль коэффициента передачи можно определить соотношением:

$$|H(f)| = |K| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_H}{f}\right)^2}} \quad (6)$$

Для RL цепи резонансная частота $\omega_H = \frac{R}{L}$.

Выражение для $H(f)$ можно привести к следующему виду

$$H(f) = K = \frac{1 + j\frac{f_H}{f}}{1 + \left(\frac{f_H}{f}\right)^2} \quad (7)$$

тогда

$\text{tg } \varphi = \frac{f_H}{f}$, $\varphi = \text{arctg } \frac{f_H}{f}$ – фазочастотная характеристика. Общий вид

АЧХ и ФЧХ приведен на рисунке 3.

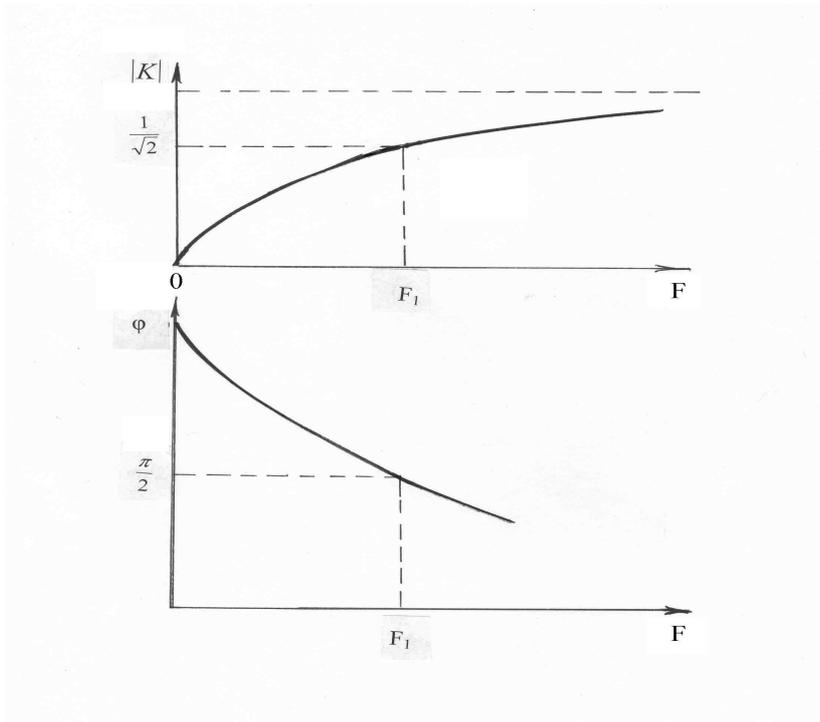


Рисунок 3.

При временном подходе цепь характеризуется переходной характеристикой или переходной функцией, т.е. откликом цепи на подачу единичного скачка напряжения.

Для дифференциальной цепи при $t \geq 0$ переходная характеристика имеет вид:

$$h(t) = e^{-\frac{t}{T}} \quad (8)$$

Где T – постоянная времени

$$T = RC \quad \text{для } RC \text{ - цепи или} \quad T = \frac{L}{R} \quad \text{для } LR \text{ - цепи; } T = \frac{1}{\omega_H}$$

Если на вход дифференцирующей цепи подать возрастающее напряжение (рисунок 4а)

$$U_{\text{Вх}} = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ kt & \text{при } t \geq 0 \end{cases}$$

То на выходе получим сигнал:

$$U_{\text{Вых}} = \int_0^t k e^{-(t-\tau)/T} d\tau = kT(1 - e^{-t/T})$$

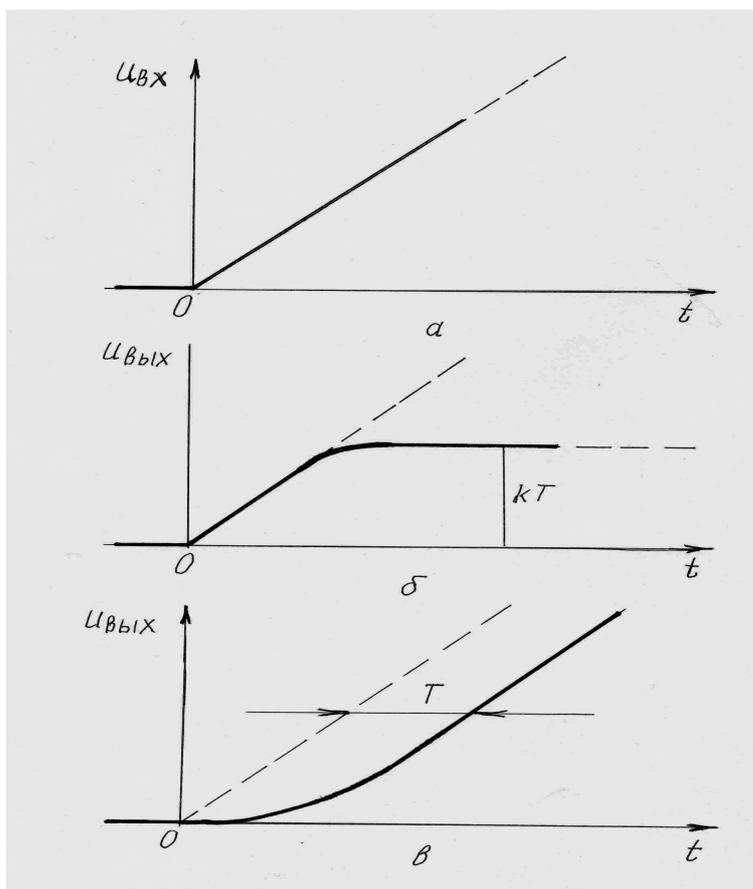


Рисунок 4.

На выходе дифференциальной цепи устанавливается постоянное напряжение, пропорциональное производной от входного напряжения. Промежуток времени t должен быть достаточно большим по сравнению с постоянной времени (рис.4б).

Дифференцирование можно осуществить только при условии, если $t/T \gg 1$, т.е. постоянная времени должна быть малой. Дифференцирующие цепи чаще всего используются для разделения постоянной и переменной составляющей сигнала, при этом для исключения частотных искажений должно выполняться условие, что частота сигнала много больше резонансной:

$$f \gg f_n = \frac{1}{2\pi RC} \quad (9)$$

Интегрирующие цепи.

На рисунке 5 представлены схемы интегрирующих цепей, выполняющих операцию интегрирования входного сигнала

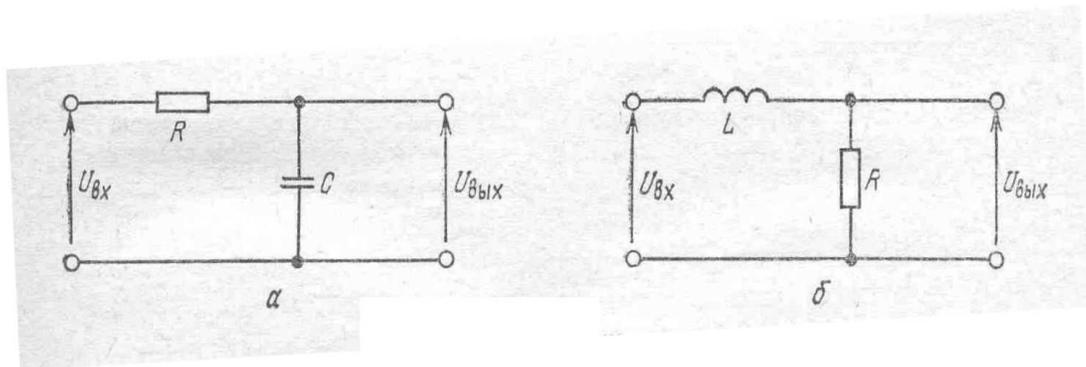


Рисунок 5.

Коэффициент передачи интегрирующей цепи определяется соотношением:

$$H(f) = K = \frac{U_{\text{Вых}}}{U_{\text{Вх}}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (10)$$

Или
$$H(f) = K = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_B}} \quad (11)$$

где $\omega_B = 2\pi f_B = \frac{1}{RC}$ определяется при равенстве активного и реактивного сопротивлений.

Для LR цепи:
$$\omega_B = \frac{R}{L}$$

Модуль коэффициента передачи можно определить соотношением:

$$|H(f)| = |K| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_B}\right)^2}} \quad (12)$$

ФЧХ для интегрирующей цепи определяется следующим образом:

$$\varphi = \text{arctg} \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad (13)$$

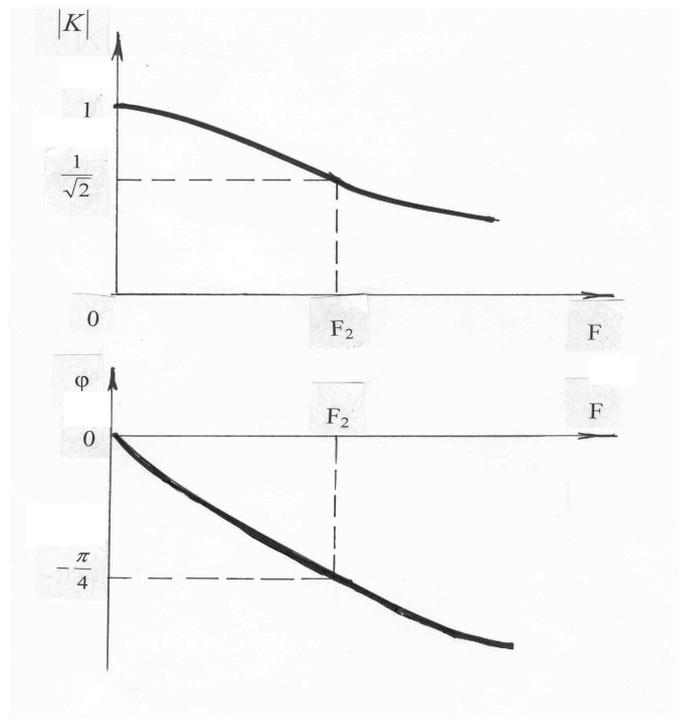


Рисунок 6.

На рисунке 6 показан вид АЧХ и ФЧХ для интегрирующей цепи.

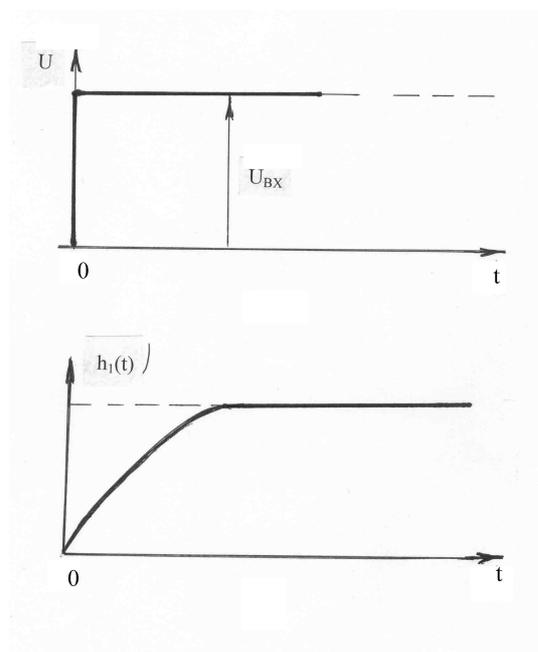


Рисунок 7.

Переходная характеристика (реакция на единичный импульс) для интегрирующей цепи записывается следующим выражением:

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}},$$

где $T = \frac{1}{\omega_B} = RC$ или $T = \frac{L}{R}$ - постоянная времени.

Реакция интегрирующей цепи на возрастающее напряжение (рис.4в) описывается выражением:

$$U_{\text{вых}} = \int_0^t K \left(1 - e^{-\left(\frac{\tau}{T}\right)} \right) d\tau = K T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (14)$$

Для осуществления интегрирования постоянная времени должна быть достаточно большой.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1: Изучение работы дифференцирующих цепей.

1. Собрать из предложенных преподавателем элементов схемы дифференцирующих цепей (5-10) вариантов.

2. Заготовить таблицу:

№	R	C	τ	t_1	t_2	U_1	U_2	$\tau_{\text{экс}}$	ε	ε	
П.п.	Ом	нФ	с	с	с	В	В	с		%	
1											
...											
5-10											

3. Рассчитать постоянные времени для различных комбинаций элементов цепи и занести данные в таблицу.

4. На вход цепи сигнал подается с разъема «Ген», снимается с разъема «Изм». Включить управляющую программу в режиме «Характеристики сигналов».

5. На вход цепи подать ступеньку напряжения U_0 (амплитуда сигнала 1-3 В). На экране компьютера наблюдать выходной сигнал.

6. Определить параметры выходного сигнала: t_1 - длительность положительного сигнала; t_2 - длительность отрицательного сигнала; U_1 - амплитуду положительного сигнала; U_2 - амплитуду отрицательного сигнала. По соотношению вычислить экспериментальное значение постоянной времени $\tau_{\text{экс}}$:

$$\tau_{\text{экспер}} = \frac{(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{U_1 - U_0}{U_2 - U_0}\right)}$$

7. Оценить относительную погрешность определения постоянной времени.

8. В режиме «Характеристики цепей» построить АЧХ и ФЧХ дифференцирующих цепей.

9. Сохранить в отдельном файле: форму сигнала, форму выходного сигнала для различных вариантов дифференцирующих цепей, вид АЧХ и ФЧХ.

Задание 2: Изучение работы интегрирующих цепей.

1. Собрать из предложенных преподавателем элементов схемы дифференцирующих цепей (3-5) вариантов.

2. Выполнить пункты 2-9 аналогичные *Заданию 1*.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Зарисовать схемы дифференцирующих и интегрирующих цепей с RC и LC элементами. Для каких цепей применяются дифференцирующие и интегрирующие цепи?

2. Записать выражения для определения формы сигнала для дифференцирующих и интегрирующих цепей.

3. Записать выражения для АЧХ и ФЧХ дифференцирующих и интегрирующих цепей.

4. Что такое переходная характеристика цепи?

5. Записать выражения для переходных характеристик дифференцирующих и интегрирующих цепей.

ЛИТЕРАТУРА

[3]- §3.2; [5] - §11.1, 11.2

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Оборудование: Лабораторный стенд «Сигнал - 1», компьютер, навесные элементы:

Цель работы:

1. Построить АЧХ для последовательного колебательного контура.
2. Определить резонансные частоты различных колебательных контуров.
3. Провести анализ влияния параметров контура на вид ФЧХ.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Простейшая цепь, состоящая из индуктивности L , емкости C и активного сопротивления R называется колебательным контуром.

Колебательные контуры получили широкое распространение в различных радиотехнических схемах. В основном используются резонансные свойства колебательного контура, откуда следует избирательность контура при выделении основных частот сигнала.

Соединение элементов R , L , C последовательно представляет собой последовательный колебательный контур (рис.1а).

Полное сопротивление контура определяется суммой активного и реактивного сопротивлений. Полное сопротивление контура в комплексном виде имеет вид:

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1)$$

Где R - активное сопротивление контура;

$(\omega L - 1/\omega C)$ - реактивное сопротивление контура, которое складывается из индуктивного и емкостного сопротивлений соответственно.

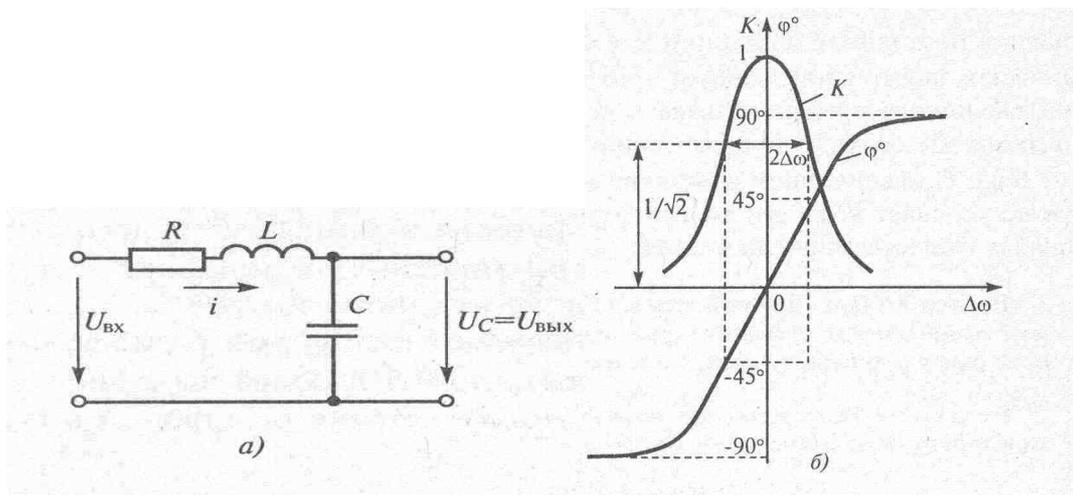


Рисунок 1.

Активное сопротивление колебательных контуров лежит в пределах нескольких единиц или десятков Ом.

Рассмотрим реакцию последовательного колебательного контура на воздействие синусоидального входного сигнала. Пусть э.д.с. является синусоидальным сигналом:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos(\omega t),$$

рассмотрим случай, когда начальная фаза сигнала равна нулю $\psi = 0$, тогда для комплексной амплитуды тока можно записать соотношение:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{\varepsilon}_m}{\dot{Z}} \quad (2),$$

где $\dot{\varepsilon}_m = \varepsilon_m e^{j\psi}$; $\dot{Z} = R + jX = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = Z e^{j\varphi}$,

тогда $\dot{I}_m = \frac{\varepsilon_m}{Z} e^{j(\psi-\varphi)}$.

При $\psi = 0$ данное соотношение будет иметь вид: $\dot{I}_m = \frac{\varepsilon_m}{Z} e^{j\varphi}$

Если $\dot{I}_m e^{j\omega t} = I_m e^{j(\omega t - \varphi)}$ - комплекс тока, то мгновенное значение силы тока можно представить как гармоническую функцию:

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi)$$

причем

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{\varepsilon_m}{R \sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (4)$$

φ - фазовый угол комплексного сопротивления.

Из последних соотношений видно, что колебательный контур является цепью, работа которой зависит от частотного спектра входного сигнала.

Наибольшее значение тока в контуре можно получить, если частота внешней э.д.с. будет равна резонансной частоте контура $\omega = \omega_p$, которая удовлетворяет условию равенства реактивного сопротивления нулю (иногда ω_p называют собственной частотой контура), т.е.

$$X = \omega_p L - \frac{1}{\omega_p C} = 0 \quad \text{или} \quad \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C}$$

При этом амплитуда тока является действительной величиной, определяется только активной составляющей тока и записывается соотношением:

$$I_{pm} = \frac{\varepsilon_m}{R}$$

Резонансная частота ω_p контура определяется из равенства реактивного сопротивления нулю, откуда следует, что резонансная частота контура равна:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Если частота внешней э.д.с. совпадает с резонансной частотой контура $\omega = \omega_p$, то в контуре возникает резонанс напряжений. Контур же настроенный на частоту э.д.с. называется настроенным контуром.

Величина обратная f_p является периодом колебаний.

$$T_p = \frac{1}{f_p} = 2\pi\sqrt{LC} \quad - \text{данное соотношение называется формулой}$$

Томсона.

Рассчитаем напряжение на всех элементах контура, учитывая что фазовый сдвиг отсутствует, т.е. $\varphi = \varphi_p = 0$.

а) на сопротивлении R напряжение равно:

$$\dot{U}_{R_{pm}} = \dot{I}_{pm} R = \frac{\mathcal{E}_m}{R} R = \mathcal{E}_m \quad (5)$$

б) на катушке индуктивности L напряжение равно:

$$\dot{U}_{L_{pm}} = \dot{I}_{pm} (j\omega_p L) = I_{pm} \omega_p L e^{j\frac{\pi}{2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \omega_p L e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (6)$$

в) на конденсаторе C напряжение равно:

а) на сопротивлении R напряжение равно:

$$\dot{U}_{R_{pm}} = \dot{I}_{pm} R = \frac{\mathcal{E}_m}{R} R = \mathcal{E}_m \quad (7)$$

б) на катушке индуктивности L напряжение равно:

$$\dot{U}_{L_{pm}} = \dot{I}_{pm} (j\omega_p L) = I_{pm} \omega_p L e^{j\frac{\pi}{2}} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \omega_p L e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (8)$$

в) на конденсаторе C напряжение равно:

$$\dot{U}_{C_{pm}} = \dot{I}_{pm} = \frac{1}{j\omega_p C} = I_{pm} \frac{1}{\omega_p C} e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (9)$$

Величина емкостного и индуктивного сопротивления контура представляет собой характеристическое или волновое сопротивление контура:

$$\omega_p = \frac{1}{\omega_p C} = \rho \quad \text{или}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{с учетом} \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

Волновое сопротивление контуров имеет порядок сотен и тысяч Ом. При резонансе происходит перераспределение энергии между реактивными элементами. Источник расходует энергию лишь на потери в активном сопротивлении.

Кроме волнового сопротивления любой контур характеризуется добротностью или качеством контура:

$$Q = \frac{\rho}{R} \quad (11)$$

Добротность является безразмерной величиной.

Величина, обратная добротности называется затуханием контура

$$\frac{1}{Q} = \frac{R}{\rho} = d \quad (13)$$

Вводя добротность в выражения для напряжения на реактивных элементах, получим:

$$\dot{U}_{L_{pm}} = Q\varepsilon_m e^{j\frac{\pi}{2}}; \dot{U}_{C_{pm}} = Q\varepsilon_m e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (13)$$

Таким образом, на реактивных элементах при резонансе происходит увеличение э.д.с. в Q раз.

Векторная диаграмма резонанса напряжений в последовательном контуре представлена на рисунке 2.

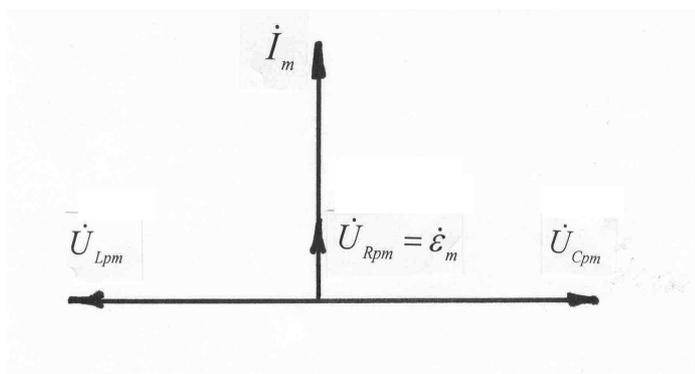


Рисунок 2.

Свойство контура выбирать только частоты близкие к резонансной называется частотной избирательностью контура.

Избирательные свойства контура определяется шириной его амплитудно-частотной характеристикой АЧХ (рис.1б).

Ширину АЧХ (см. рис. 1б) выбирают из условия, что выделяемая в контуре мощность в два раза меньше, чем при резонансе.

$$\frac{P}{P_2} = \frac{1}{2}$$

С учетом того, что мощность пропорциональна квадрату силы тока $P \sim I^2$, можно записать:

$$\frac{I_m}{I_{mp}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

Относительная ширина пропускания контура определяется, исходя из добротности контура, и определяется соотношением:

$$S = \frac{1}{Q} = d \quad (13)$$

В реальных схемах полосу пропускания выбирают исходя из частотного спектра сигнала.

Фазочастотная характеристика последовательного колебательного контура представлена на рис.1б, аналитическое выражение может быть записано в виде:

$$tg \varphi = \frac{X}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (14)$$

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Собрать на наборном поле схему последовательного колебательного контура согласно рис.1
2. Заготовить таблицу

№	C	R	K	$F_{рез}$	Q	$K_{срез}$	F_1	F_2	ΔF	$F_{рез.экс}$
П.п.	$n\Phi$	$Ом$		$Гц$			$Гц$	$Гц$	$Гц$	$Гц$
1										
....										
10										

3. Из предложенных элементов собрать 10 схем колебательных контуров с различными значениями емкости C и сопротивления R . Индуктивность катушки остается постоянной $L=2\text{мГн}$.

4. Рассчитать резонансную частоту $F_{рез}$ и добротность Q для каждого из собранных контуров, значения занести в таблицу.

5. На вход контура подать синусоидальный сигнал, параметры которого задаются в режиме «Характеристика сигнала» на компьютере. Рекомендуется амплитуду сигнала выбрать в диапазоне 1-5 В, частоту входного сигнала в диапазоне 0-400Гц. Режим «Характеристика сигнала» позволяет одновременно с входным сигналом наблюдать и выходной сигнал.

6. Включить режим «Характеристики цепей». Активировать операцию снятия АЧХ, запустить режим измерения параметров кнопкой однократное измерение. Определить значения: K - максимальное значение коэффициента передачи; $K_{срез}$ - значение коэффициента передачи на частоте среза; F_1 и F_2 - нижнюю и верхнюю частоты среза; $\Delta F = F_2 - F_1$ - диапазон пропускания; $F_{рез.экс}$ - экспериментальное значение резонансной частоты.

Частота среза определяется на уровне $\frac{K}{\sqrt{2}}$.

7. В режиме «Характеристики цепей» активировать операцию снятия ФЧХ. Определить диапазон изменения фазы.

8. По данным таблицы построить зависимости добротности контура от сопротивления $Q=f(R)$ и диапазона пропускания от сопротивления $\Delta F=f(R)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Записать соотношения, определяющие основные характеристики последовательного колебательного контура.
2. Записать выражения для АЧХ и ФЧХ последовательного колебательного контура.
3. Дать определение следующим величинам: добротность контура, волновое сопротивление, затухание контура.
4. Как определяется полоса пропускания последовательного колебательного контура.
5. Что такое абсолютная и относительная расстройка контура.
6. Изобразить на рисунке векторную диаграмму, поясняющую возникновение резонанса напряжений. Записать, как определяется напряжение на всех элементах цепи.

ЛИТЕРАТУРА

[1]- §2.5; [4]-3.3.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА.

Оборудование: Лабораторный стенд «Сигнал - 1», компьютер, навесные элементы:

Цель работы:

1. Построить АЧХ для параллельного колебательного контура.
2. Определить резонансные частоты различных колебательных контуров экспериментальным и расчетным путем.
3. Провести анализ влияния параметров контура на вид ФЧХ.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Параллельный колебательный контур можно построить различными способами в зависимости от сочетания элементов в ветвях контура (рис.1):

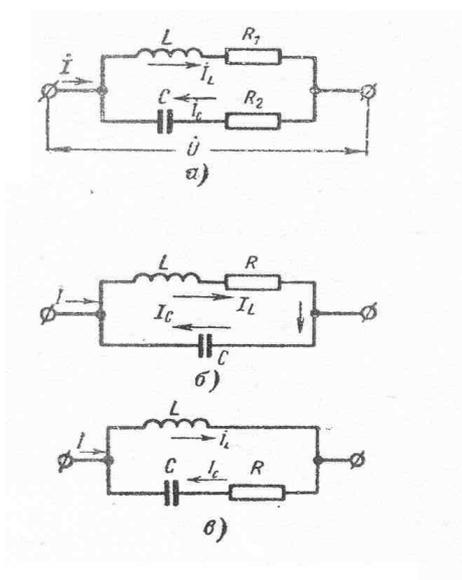


Рисунок 1.

Реактивные составляющие тока в ветвях можно определить следующим образом (все соотношения записаны для схемы на рис. 1а):

$$i_{1m}^{(p)} = \frac{\dot{U}_m}{R_1 + j\omega L} = \frac{\dot{U}_m}{Z_1^2} R_1 - j \frac{\dot{U}_m}{Z_1^2} \omega L = -j \frac{\dot{U}_m \rho}{\rho^2} = \frac{\dot{U}_m}{\rho} e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (1)$$

Для подобных контуров вблизи рабочей частоты
 $R_1 \gg |X_1|$; $R_2 \ll |X_2|$
 X_1 и X_2 – реактивные сопротивления ветвей контура.

Если пренебречь активным сопротивлением в ветвях контура, то сопротивления ветвей.

$$Z_{1p} \approx \rho \quad R \rightarrow 0$$

$$Z_{2p} \approx \rho \quad R \rightarrow 0$$

$$\dot{I}_{2m}^{(p)} = \frac{\dot{U}_m}{R_2 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\dot{U}_m}{Z_2^2} R_2 + j \frac{\dot{U}_m}{Z_2^2} \frac{1}{\omega C} = j \frac{\dot{U}_m \rho}{\rho^2} = \frac{\dot{U}_m}{\rho} e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (2)$$

Токи равны по величине и сдвинуты по фазе на π . Активные составляющие токов в ветвях контура можно записать в виде:

$$\dot{I}_{1pm}^{(a)} = \frac{\dot{U}_m R_1}{\rho^2}; \quad \dot{I}_{2pm}^{(a)} = \frac{\dot{U}_m R_2}{\rho^2};$$

результатирующий ток определяется соотношением:

$$\dot{I}_{pm} = \dot{I}_{pm}^{(a)} = \frac{\dot{U}_m (R_1 + R_2)}{\rho^2} = \frac{\dot{U}_m R}{\rho^2} \quad (3);$$

где $R = R_1 + R_2$

Сопротивление контура при резонансе

$$R_{к.р} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_{pm}} = \frac{\rho^2}{R} = \frac{L}{RC} = Q\rho = Q^2 R \quad (4)$$

Резонансное сопротивление контура тем выше, чем больше добротность. Относительность реактивных составляющих только при резонансе к току во внешней цепи

$$\frac{\dot{I}_{1pm}^{(p)}}{\dot{I}_{pm}} = \frac{\dot{I}_{2pm}^{(p)}}{\dot{I}_{pm}} = Q \quad (5)$$

В любой момент времени реактивные составляющие токов в ветвях равны по величине и противоположны по направлению. Векторная диаграмма представлена на рисунке 2.

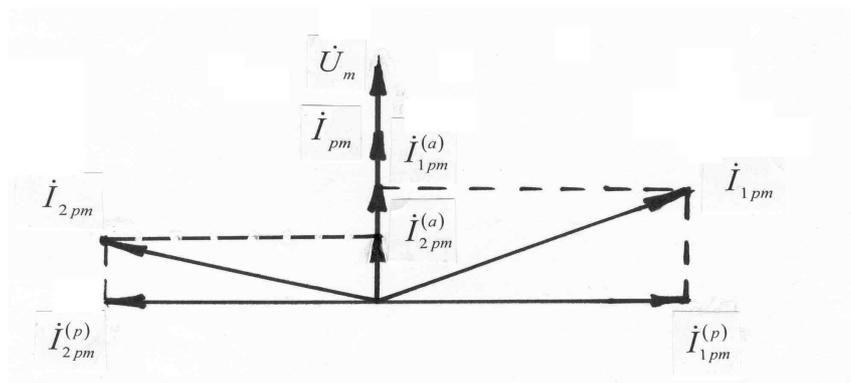


Рисунок 2.

Амплитуда реактивной составляющей в Q раз больше амплитуды тока во внешней цепи. Это означает, что в параллельном контуре происходит резонанс токов.

Аналитически АЧХ параллельного колебательного контура выражается с учетом резонансного сопротивления и записывается в виде:

$$K(\Delta\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_p}\right)^2}} \quad (5)$$

ФЧХ параллельного колебательного контура определяется соотношением:

$$\varphi = -\arctg\left(2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_p}\right) \quad (6)$$

АЧХ и ФЧХ параллельного колебательного контура представлены на рис. 3. Амплитудное значение напряжения определяется соотношением:

$$U_m \geq \frac{U_{pm}}{\sqrt{2}} = 0,707U_{pm}$$

Относительная ширина пропускания контура определяется из формулы:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + (Q \cdot S)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

отсюда

$$S = \frac{R\Delta f_n}{f_p}$$

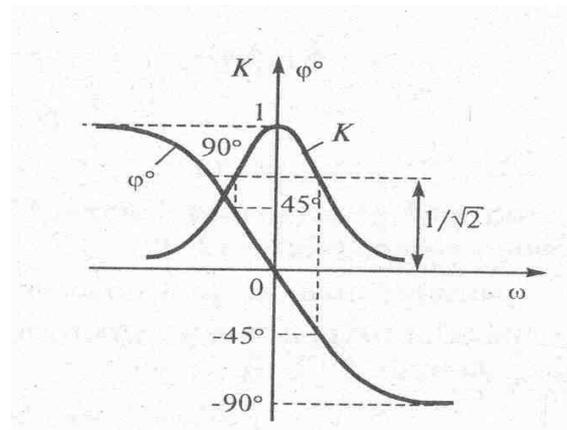


Рисунок 3.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Собрать на наборном поле схему параллельного колебательного контура согласно рис.1

2. Заготовить таблицу

№	C	R	K	$F_{рез}$	Q	$K_{срез}$	F_1	F_2	ΔF	$F_{рез.экс}$
П.п.	$n\Phi$	$Ом$		$Гц$			$Гц$	$Гц$	$Гц$	$Гц$
1										
....										
5										

3. Из предложенных элементов собрать 5 схем колебательных контуров с различными значениями емкости C и сопротивления R . Индуктивность катушки остается постоянной $L=2мГн$.

4. Рассчитать резонансную частоту $F_{рез}$ и добротность Q для каждого из собранных контуров, значения занести в таблицу.

5. На вход контура подать синусоидальный сигнал, параметры которого задаются в режиме «Характеристика сигнала» на компьютере. Рекомендуется амплитуду сигнала выбрать в диапазоне 1-2 В, частоту входного сигнала в диапазоне 0-200Гц. Режим «Характеристика сигнала» позволяет одновременно с входным сигналом наблюдать и выходной сигнал.

6. Включить режим «Характеристики цепей». Активировать операцию снятия АЧХ, запустить режим измерения параметров кнопкой однократное измерение. Определить значения: K - максимальное значение коэффициента передачи; $K_{срез}$ - значение коэффициента передачи на частоте среза; F_1 и F_2 - нижнюю и верхнюю частоты среза; $\Delta F = F_2 - F_1$ - диапазон пропускания; $F_{рез.экс}$ - экспериментальное значение резонансной частоты.

Частота среза определяется на уровне $\frac{K}{\sqrt{2}}$.

7. В режиме «Характеристики цепей» активировать операцию снятия ФЧХ. Определить диапазон изменения фазы.

8. По данным таблицы построить зависимости добротности контура от сопротивления $Q=f(R)$ и диапазона пропускания от сопротивления $\Delta F=f(R)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Записать соотношения, определяющие основные характеристики параллельного колебательного контура. Зарисовать возможные схемы параллельного колебательного контура.

2. Записать выражения для АЧХ и ФЧХ параллельного колебательного контура.

3. Как определяется сопротивление контура при резонансе?

4. Как определяется полоса пропускания последовательного колебательного контура.

5. Что такое абсолютная и относительная расстройка контура.

6. Изобразить на рисунке векторную диаграмму, поясняющую возникновение резонанса токов. Записать, как определяется сила тока на всех элементах цепи.

ЛИТЕРАТУРА

[1]- §2.5; [4]- §3.3; [7]- §9.1

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

АНАЛИЗ РАБОТЫ ФИЛЬТРОВ

Оборудование: Лабораторный стенд «Сигнал - 1», компьютер, навесные элементы:

Цель работы:

1. Изучить работу фильтров различного вида.
2. Построить АЧХ и ФЧХ фильтров и определить граничную частоту.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

На основе схем четырехполюсников строятся широко применяемые в устройствах радиоэлектроники **фильтры**.

Фильтрами называются устройства, у которых в определенном интервале частот изменяется коэффициент затухания.

Фильтры используются для ликвидации шумов в системе, обеспечения пропускания одних сигналов и задержки других. Фильтры строятся на реактивных элементах. Фильтры, выполняющие операцию ослабления сигнала, при сохранении входного и выходного реактивных сопротивлений. Такие фильтры называются аттенюаторами и магазинами затухания и строятся на постоянных и переменных резисторах.

Фильтры подразделяются на **фильтры нижних частот**, пропускают сигналы с частотами ниже $f_{гр}$.

Фильтры верхних частот пропускают сигналы с частотами выше частоты $f_{гр}$.

Полосовые фильтры. Частоты лежат в интервале от $f_{гр1}$ до $f_{гр2}$.

Режекторные фильтры. Задерживают частоты от $f_{гр1}$ до $f_{гр2}$.

Если фильтры содержат только реактивные сопротивления, то согласно теории четырехполюсников:

$$ch \gamma = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} = A$$

с учетом того, что $\gamma = \alpha + j\beta$, можно записать:

$$ch \alpha \cos \beta = A \qquad sh \alpha \sin \beta = 0$$

В последнем равенстве либо $\alpha = 0$, либо $\beta = 0$. Если $\alpha = 0$, то $ch \alpha = 1$, $\cos \beta = A$.

Это возможно лишь при $|A| \leq 1$. Это означает, что фильтр пропускает сигналы без затухания, если выполняется соотношение:

$$-1 < 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} < 1 \text{ или}$$

$$-1 < \frac{Z_1}{4Z_2} < 0$$

Это неравенство является основным соотношением теории фильтров и позволяет определить полосу пропускания фильтра.

За пределами полосы пропускания $\beta = 0$, $\cos \beta = 1$, следовательно

$$ch \alpha = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2}$$

Это равенство позволяет определить затухание за пределами полосы пропускания.

Фильтры типа к

Если для фильтра, состоящего из реактивных элементов, выполняется соотношение

$$Z_1 Z_2 = k^2,$$

то они называются фильтрами k – типа. Примеры построения схем приведены на рис.1.

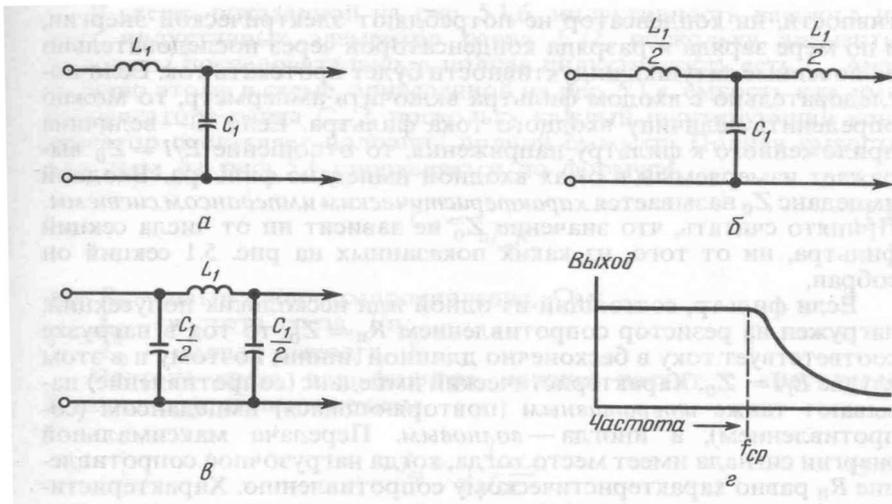


Рисунок 1.

Если фильтры не содержат резистивных компонентов, то ни L , ни C не потребляют энергии, то по мере заряда и разряда C через катушки будет протекать ток.

$$\text{Характеристическое сопротивление } Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Входное сопротивление не зависит от приложенного напряжения. Если фильтр работает на нижних частотах, то его параметры определяются из соотношений:

$$L = \frac{R_n}{\pi f_{cp}}; \quad R_n - \text{сопротивление нагрузки}$$

$$C = \frac{1}{\pi f_{cp} R_n}$$

$$f_{cp} = \frac{1}{\pi \sqrt{LC}}$$

Обычно сопротивление нагрузки выбирают равным характеристическому $R_n = Z_c$. Общий вид АЧХ приведен на рис.1г.

Схемы фильтров, работающих на верхних частотах приведены на рис.2, АЧХ фильтров верхних частот приведена на рис.2г.

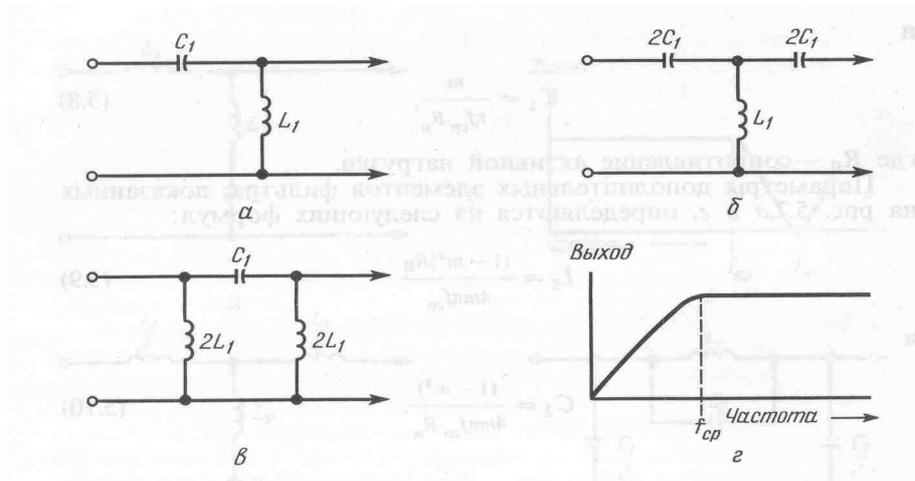


Рисунок 2.

Основные параметры фильтров рассчитываются по соотношениям приведенным ниже.

$$L = \frac{R_n}{4\pi f_{cp}}$$

$$C = \frac{1}{4\pi f_{cp} R_n}$$

$$f_{cp} = \frac{1}{4\pi \sqrt{ZC}}$$

Для высокочастотных составляющих емкостное сопротивление конденсатора будет уменьшаться, и они проходят на выход фильтра.

Характеристическое сопротивление фильтров зависит от частоты.

Для T-образного фильтра характеристическое сопротивление определяется по формуле:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{cp}}\right)^2}$$

Для П-образного фильтра:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{cp}}\right)^2}}$$

Фильтры типа *m*

На основе фильтра типа *k* можно построить фильтры типа *m*, которые обеспечивают более четкий срез частотной характеристики. Фильтр типа *m* строится таким образом, чтобы на определенной частоте за частотой среза f_{cp} обеспечивалось бесконечно большое ослабление сигнала. Примеры схем для построения фильтров нижних частот типа *m* приведены на рис.3, на рис.3б показана АЧХ такого фильтра.

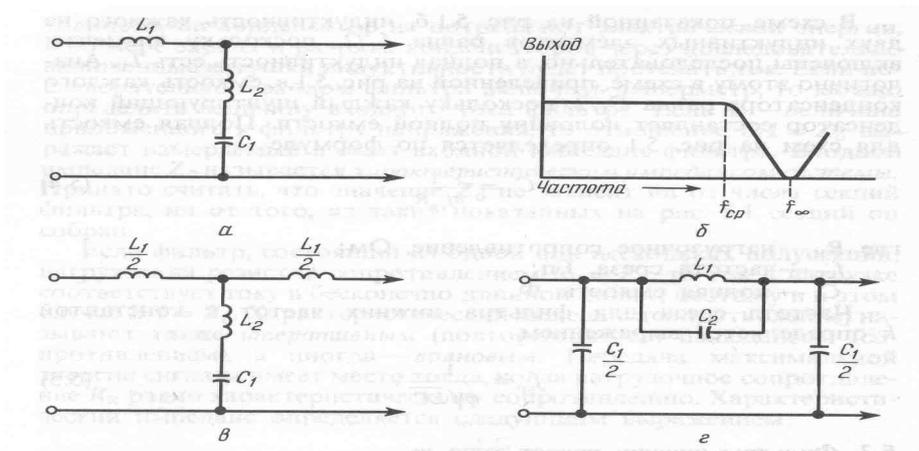


Рисунок 3.

Включенная параллельно последовательная цепь L_2C_1 на определенной частоте является резонансной и шунтирует входные клеммы, т.к. сопротивление этой цепи на резонансе минимальное. Для фильтра нижних частот *m* определяется выражением

$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{zp}}{f_{\infty}} \right)^2} \quad f_{\infty} - \text{частота бесконечно большого ослабления.}$$

Значение m находится между нулем и единицей и обычно составляет 0,6.

На верхних частотах включается дополнительный конденсатор C_2 . Схемы фильтров нижних частот и АЧХ таких фильтров приведены на рисунке 4.

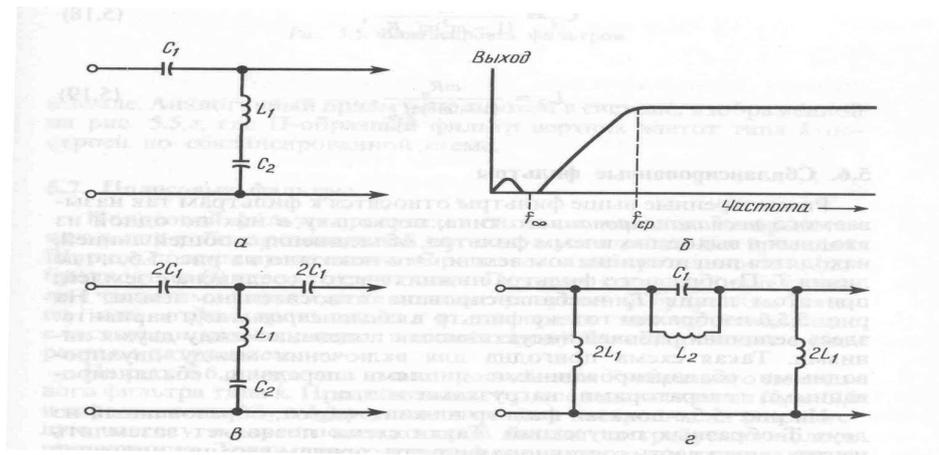


Рисунок 4.

Цепь L_1 и C_2 последовательного резонанса оказывает сильное шунтирующее действие, которое приводит к бесконечно большому затуханию в точке $f = f_{\infty}$, ниже частоты среза. Для верхних частот

$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{\infty}}{f_{cp}} \right)^2}$$

Все рассмотренные выше фильтры являются **несбалансированными**, т.к. одна входящая и одна выходящая клеммы находятся под потенциалом земли. Если включить дополнительную индуктивность, то получим **сбалансированный** фильтр (рис.5а,б).

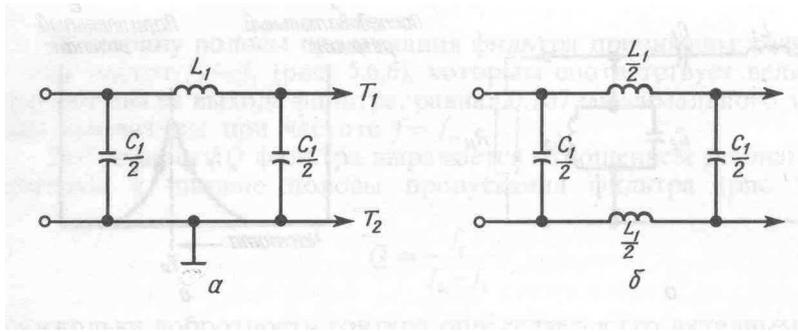


Рисунок 5.

Такая схема пригодна для включения между двухпроводными сбалансированными линиями передачи, генераторами, нагрузками и т.д.

Полосовой фильтр

Полосовые фильтры пропускают сигналы, частоты которых лежат выше и ниже резонансной высоты в установленных пределах. Ширина полосы определяется добротностью схем. Схемы таких фильтров приведены на рис. 6.

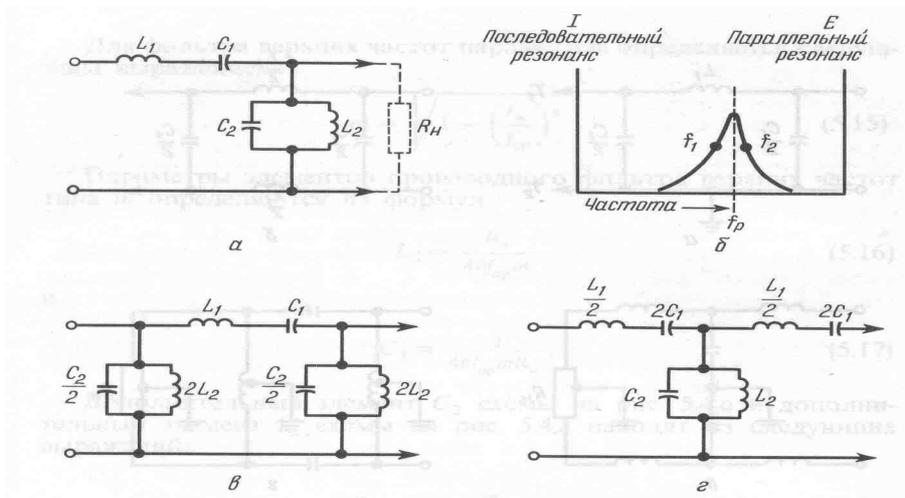


Рисунок 6.

Последовательные и параллельные резонансные цепи настроены на резонансную частоту, в окрестности которой находится полоса пропускания.

Вблизи резонансной частоты f_p цепь последовательного резонанса L_1 и C_1 имеет низкое реактивное сопротивление, такие составляющие сигнала проходят на выход фильтра. Цепь параллельного резонанса C_2 и L_2 представляет для этих составляющих высокое реактивное сопротивление.

Для частот выше и ниже резонансной f_p последовательная цепь представляет высокое сопротивление, и такие сигналы на выход фильтра не проходят.

Добротность фильтра определяется соотношением:

$$Q = \frac{f_p}{f_1 - f_2}$$

Добротность последовательного контура равна:

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Для параллельного резонансного контура добротность определяется по формуле:

$$Q = \frac{R}{X_L},$$

где R – эквивалентное активное сопротивление.

Фильтр Баттерворта

Фильтр представляется как конечная линейная электронная схема с сосредоточенными параметрами. Если реальная схема фильтра является нелинейной, то при анализе ее можно представить как линейную и описать линейным дифференциальным уравнением некоторого порядка n :

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_n \frac{d^n x}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + b_1 \frac{dx}{dt} + \dots + b_0 x,$$

где $x = x(t)$ - входной сигнал фильтра;

$y = y(t)$ - выходной сигнал фильтра;

$a_i, i=0, \dots, n; b_i, i=0, \dots, m$ - вещественные коэффициенты.

Для фильтров, которые могут быть реализованы схематично, выполняется соотношение $n \geq m$. Величина n называется порядком фильтра.

На практике часто используются фильтры высоких порядков, передаточные функции которых выражаются полиномами порядке $n > 2$. Это фильтры Баттерворта, Чебышева, Бесселя.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Собрать на наборном поле схему RC фильтра нижних частот на элементах, предложенных преподавателем.

2. Заготовить таблицу:

Таблица 1

№	F, кГц	U _{ВХ} , В	U _{ВЫХ} , В	K _{ЭКС}	K _{РАСЧ}
1					
....					
10					

3. От генератора, расположенного на панели стенда, на вход фильтра подать синусоидальный сигнал от клеммы «Ген». Выход фильтра соединить с клеммами «Изм».

4. В режиме «Характеристики сигнала» на экране компьютера наблюдать входной сигнал. С помощью курсоров определить параметры сигнала. Частоту сигнала изменять от 1 до 1000 кГц. Амплитуду входного сигнала изменять в интервале 1-2 В.

5. Подключить к компьютеру выход фильтра и наблюдать выходной сигнал. В режиме «Характеристики сигнала» с помощью курсоров определить амплитуду и частоту выходного сигнала.

6. Провести 5-10 измерений в указанном интервале частот и амплитуд входного сигнала. Данные занести в таблицу.

7. В режиме «Характеристики цепи » на экране виртуального осциллографа наблюдать ФЧХ и АЧХ RC фильтра. Сохранить рисунок в любом графическом редакторе, например «Графула».

8. Определить из экспериментальных зависимостей АЧХ и ФЧХ коэффициент передачи и частоту среза фильтра. Частота среза определяется на уровне $\frac{K}{\sqrt{2}}$.

9. Рассчитать по экспериментальным данным коэффициент передачи RC фильтра. Сравнить полученный результат с экспериментальным.

10. Собрать LC фильтр и проделать п.п. 2-9.

11. Исследовать схему фильтра Баттерворта, расположенную на панели стенда. Выполнить п.п. 2-9.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что собой представляет фильтр? Для каких целей используются эти устройства?
2. Какие бывают фильтры? Привести примеры схем фильтров различного вида.
3. Что такое частота среза? Что называется передаточной функцией фильтра?
4. Записать основное соотношение теории фильтров.
5. Как описываются нелинейные фильтры?

ЛИТЕРАТУРА

[1] - §4.6-4.8; [4] - §3.7; [5] - §5.1-5.7; [7] - §13.2, 13.3

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРНОГО УСИЛИТЕЛЯ С РАЗЛИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ

Оборудование: Лабораторный стенд «Сигнал - 1», компьютер, навесные элементы:

Цель работы:

1. Изучить работу биполярного транзистора в режиме усиления.
2. Выяснить влияние вида нагрузки на работу усилителя.
3. Снять АЧХ усилителя с различными видами нагрузки и определить коэффициент передачи.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Режим усиления тока или напряжения является одним из основных режимов работы биполярного транзистора. Коэффициент усиления транзистора определяется отношением выходного тока (напряжения) к входному току (напряжению). Величина коэффициента усиления зависит от способа включения транзистора в электронную схему. Наиболее широко используется схема включения с общим эмиттером (рис. 1).

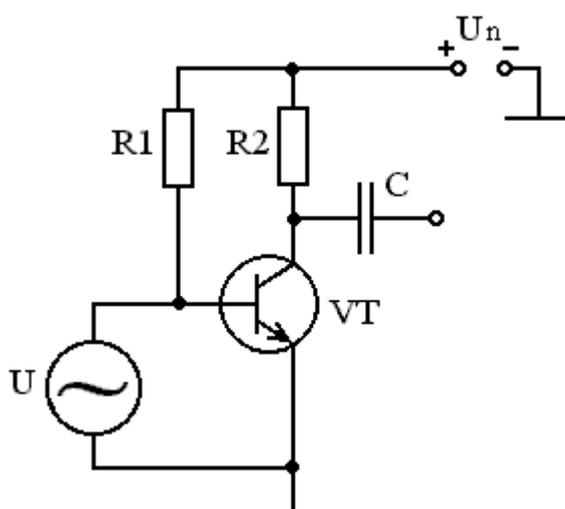


Рисунок 1.

Рассмотрим основные характеристики такого усилителя. Входными параметрами являются ток базы I_b и напряжение между базой и эмиттером

$U_{бэ}$. Выходными параметрами – ток коллектора I_k и напряжение между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$. Т.к. напряжение $U_{бэ}$ подается на эмиттерный переход в прямом направлении, то небольшое изменение напряжения приводит к значительному изменению тока базы и работе транзистора в активном режиме. Переход база-коллектор закрыт. Входное сопротивление схемы:

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{б}} \quad \text{при } U_{кэ} = const \quad (1)$$

Входное сопротивление достаточно высокое (сотни Ом, десятки кОм).

Выходное сопротивление схемы:

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_k} \quad \text{при } I_{б} = const \quad (2)$$

По порядку величины сопротивление составляет десятки и сотни кОм.

Согласно законам Кирхгофа

$$I_{э} = I_k + I_{б} \quad (3)$$

Коэффициент усиления по току:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_{б}} \quad (4)$$

Коэффициент усиления по напряжению зависит от величины коллекторного сопротивления R_k .

$$\alpha = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta U_{бэ}} \quad (5)$$

Напряжение, снимаемое с коллектора, изменяется в противофазе с выходным напряжением.

На входе и выходе схемы включаются разделительные конденсаторы C_1 и C_2 . Их назначение – фильтрация постоянной составляющей входного и выходного сигнала.

Кроме того, в реальном усилителе предусмотрена стабилизация рабочей точки транзистора. Для этого на входе схемы ставится делитель R_1 и

R_2 (рис.2.) . При этом токи, протекающие в цепях транзистора, будут постоянными $I_b = const, I_s = const, I_k = const$.

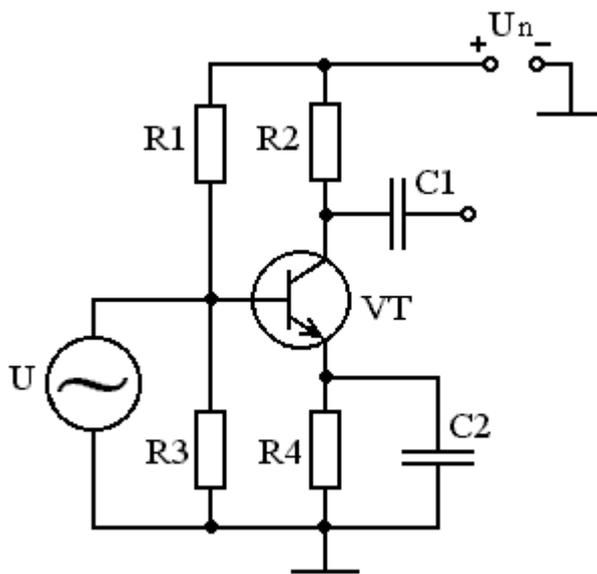


Рисунок 2.

Для стабилизации режима работы при изменения температуры в цепь эмиттера включается резистор R_4 . Вместе с резисторами R_1 и R_3 резистор R_4 образуют цепь отрицательную обратной связи (ООС) по току. Именно наличие ООС и обеспечивает термостабилизацию. При возрастании температуры через транзистор начинает течь обратный ток коллектора, величина которого возрастает с ростом температуры. Напряжение на резисторе R_4 возрастает, что приводит к перераспределению напряжения питания U_n на резисторах R_1 и R_3 таким образом, что напряжение на сопротивлении R_2 возрастает ток через резистор увеличивается до номинального значения. Дополнительное падение напряжения на R_4 в эмиттерной цепи приводит к снижению коэффициента усиления по напряжению, т.к. уменьшается входное напряжение при работе на переменном токе.

Для исключения ООС по переменному току резистор R_4 шунтируют конденсатором достаточно большой емкости C_2 .

При расчетах усилителей на биполярном транзисторе в схеме с общим эмиттером (ОЭ) исходят из характеристик конкретного транзистора и получения нужного коэффициента усиления. На выходных характеристиках

транзистора строят нагрузочные линии по постоянному и переменному току, а затем рассчитывают параметры схемы.

В значительной степени работа усилителя определяется видом нагрузки, которая включается в цепь коллектора. Нагрузка может быть как чисто резистивной, так и частотозависимой. В первом случае - это усилитель напряжения или тока, во втором - избирательный усилитель, широкополосный усилитель, усилитель мощности. В качестве частотозависимой нагрузки используется колебательный контур - резонансные усилители.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Задание 1: изучение работы усилителя с резистивной нагрузкой.

1. На стенде подключить усилитель к источнику питания. Напряжение питания усилителя – 8 В. Напряжение с выхода усилителя подается на гнездо U_2 .
2. Поставить переключатель в положении (1). При этом загорается соответствующий светодиод. В этом случае нагрузкой служит резистор $R_I=10$ кОм.
3. В режиме «Характеристики сигнала» на экране компьютера наблюдать входной и выходной сигналы. Амплитуду входного сигнала изменять в пределах 30 – 50 мВ, частоту от 0,5 до 1 кГц. Определить значения входного и выходного сигнала для 10-15 точек. Данные занести в таблицу.

№	$U_{ВХ}$	$U_{ВЫХ}$	$\nu_{ВХ}$	$\nu_{ВЫХ}$	$K_{РАСЧ}$	$K_{ЭКСП}$

4. На усилитель подать смещение 0,7 – 0,8 В. В режиме «Характеристики цепей» построить АЧХ усилителя. Определить коэффициент передачи.

Задание 2: изучение работы резонансного усилителя.

1. Поставить переключатель в положение (2). При этом к выходу усилителя подключается колебательный контур с резонансной частотой 100 кГц и резонансным сопротивлением около 10 кОм.
2. В цепи эмиттера включен резистор R_3 , назначение которого – стабилизация режима работы усилителя и получение сигнала для наблюдения формы импульсов тока, протекающего через транзистор в режиме нелинейного резонансного усиления. Напряжение с резистора R_3 через вспомогательный усилитель поступает на гнездо U_3 . Выходной сигнал снимается с выхода U_3 .
3. В режиме «Характеристики сигнала» на экране компьютера наблюдать входной и выходной сигналы. Амплитуду входного сигнала изменять в пределах 30 – 50 мВ, частоту от 1,3 до 1,5кГц. Определить значения входного и выходного сигнала для 10-15 точек. Данные занести в таблицу, аналогичную таблице в задании 1.
4. На усилитель подать смещение от 0,2 до 1.0 В. В режиме «Характеристики цепей» построить АЧХ усилителя. Определить коэффициент передачи.
5. Поставить переключатель в положение (3). Нагрузкой усилителя является тот же колебательный контур, зашунтированный резистором $R_2=10$ кОм.
6. Прodelать пункты 3, 4.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислить основные характеристики усилителя с ОЭ.
2. Что такое коэффициент усиления? Как определяется коэффициент усиления по току и по напряжению?
3. Каким образом происходит усиление тока в схеме с общим эмиттером (ОЭ)?
4. Какого назначения делителя напряжения на входе усилителя?

5. Какие функции выполняют конденсаторы на входе и выходе усилителя.
6. Каким образом происходит стабилизация работы усилителя при повышении температуры.
7. Как влияет на работу усилителя вид нагрузки?
8. Какой усилитель называется резонансным? Привести схему такого усилителя.

ЛИТЕРАТУРА

[1]: §1.2.5; [2]: §3.4; [3]: §§ 5.6-5.8; [4]: §1.2 [6]: §7.1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Оборудование: Лабораторный стенд «Сигнал - 1», компьютер, навесные элементы:

Цель работы:

1. Изучить работу мультивибратора на ИМС. Определить параметры импульсов, генерируемых мультивибратором.
2. Изучить работу ждущего мультивибратора на ИМС. Определить параметры сигнала, генерируемого ждущим мультивибратором.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Релаксационные генераторы

Для получения прямоугольных импульсов широко используются устройства, называемые релаксационными генераторами (релаксаторами). Релаксаторы, как и триггеры, относятся к классу спусковых устройств и основаны на применении усилителей с положительной обратной связью или электронных приборов с отрицательным сопротивлением, например туннельных диодов или тиристоров.

В отличие от триггеров, обладающих двумя состояниями устойчивого равновесия, релаксаторы имеют не более одного состояния, характеризуются сравнительно медленными изменениями токов и напряжений, приводящими к некоторому критическому состоянию, при котором создаются условия для скачкообразного перехода релаксатора из одного состояния в другое.

Релаксаторы могут работать в одном из трех режимов:

- 1) ждущий режим;
- 2) режим автоколебаний;
- 3) режим синхронизации.

В ждущем режиме релаксатор имеет состояние устойчивого равновесия – состояние квазиравновесия. Переход из первого состояния во второе происходит под действием внешнего запускающего импульса, а обратный переход – самопроизвольно по истечении некоторого времени, определяемого параметрами устройства.

Таким образом, в ждущем режиме релаксатор генерирует один импульс с определенными параметрами при воздействии запускающего импульса.

В режиме автоколебаний и релаксаторе нет состояния устойчивого равновесия, имеются только два состояния квазиравновесия. Релаксатор переходит из одного состояния квазиравновесия в другое без внешних воздействий, генерируя импульсы, параметры которых зависят от параметров релаксатора.

В режиме синхронизации частота повторения импульсов релаксатора определяется частотой внешнего синхронизирующего напряжения. Релаксатор имеет два чередующихся состояния квазиравновесия, а время пребывания в этих состояниях зависит не только от параметров релаксатора, но также от периода синхронизирующего напряжения. Если синхронизирующее напряжение снять, устанавливается режим автоколебаний.

Мультивибратором называют релаксатор с емкостной связью между каскадами. Мультивибратор, работающий в ждущем режиме, называют одновибратором. На рис. 1 изображена схема одновибратора с коллекторно-базовыми связями.

В исходном состоянии устойчивого равновесия транзистор VT_1 закрыт, а транзистор VT_2 насыщен. Для того чтобы транзистор VT_2 был в режиме насыщения, необходимо выполнить условие

$$R_2 < \beta \cdot R_6 \quad (1)$$

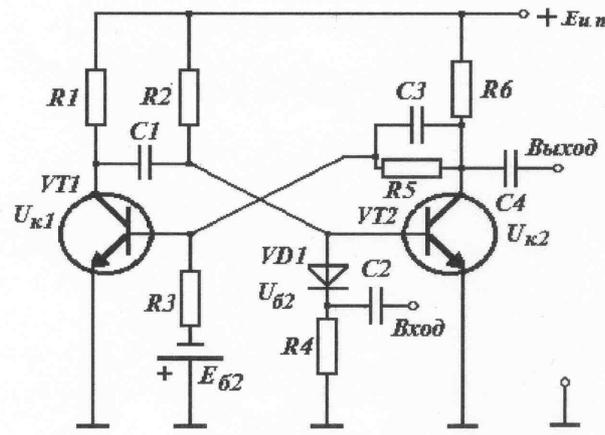


Рисунок 1.

Для закрытия транзистора VT_1 при насыщении транзистора VT_2 сопротивление резисторов R_2 и R_5 выбираются аналогично выбору сопротивлений в триггере.

Конденсатор C_1 в исходном состоянии заряжен до напряжения

$$U_{cm} = -E_n, \text{ так как } \varphi_{62} = 0, \text{ а } \varphi_{к1} = +E_n; U_{c1} = E_n; (U_{c1} = \varphi_{62} - \varphi_{к1}).$$

Воздействие короткого отрицательного импульса на базу транзистора VT_2 через цепь C_3R_4 и диод VD_1 вызывает опрокидывание одновибратора. Одновибратор переходит в состояние квазиравновесия, когда транзистор VT_1 насыщен, а транзистор VT_2 закрыт. В этом состоянии происходит процесс перезарядки конденсатора C_1 по цепи $+E_n - R_2 - C_1 -$ коллектор-эмиттер насыщенного транзистора VT_1 .

Пренебрегая сопротивлением насыщенного транзистора VT_1 , можно считать, что напряжение на конденсаторе C_1 равно напряжению промежутка база-эмиттер транзистора VT_2 . Потенциал правой обкладки конденсатора C_1 стремиться к $+E_n$, левой – к нулю, т.е. $U_{c1} = -E_n$. При $U_{c1} = 0$ – транзистор VT_2 открывается, что вызывает обратное опрокидывание одновибратора, который возвращается в исходное состояние. Однако это происходит не сразу, а по мере заряда конденсатора C_1 от источника E_n через резистор R_2 и промежуток база-эмиттер транзистора VT_2 . На выходных зажимах одновибратора (между коллектором и эмиттером транзистора VT_2)

появляется положительный импульс напряжения $U_{к2}$, близкий по форме к прямоугольному. Длительность t_u импульса мультивибратора определяется временем перезарядки конденсатора C_1 через насыщенный транзистор VT_1 . Конденсатор C_1 перезаряжается с постоянной времени $\tau_{пер} = C_1R_2$. Можно показать что длительность импульса

$$t_u \approx 0,7C_1R_2 \quad (2)$$

Цепь C_1R_2 называют времязадающей цепью. Изменением ее параметров можно регулировать длительность импульса мультивибратора. Время восстановления $t_{вос}$ определяется постоянной времени заряда конденсатора C_1 : $\tau_{зар} = C_1R_1$. Можно считать, что $t_{вос} = (3-5)C_1R_1$. Очередной запускающий импульс может поступать на вход мультивибратора через время $t = t_u + t_{вос}$. Ускоряющий конденсатор C_2 имеет то же назначение, что и в триггере.

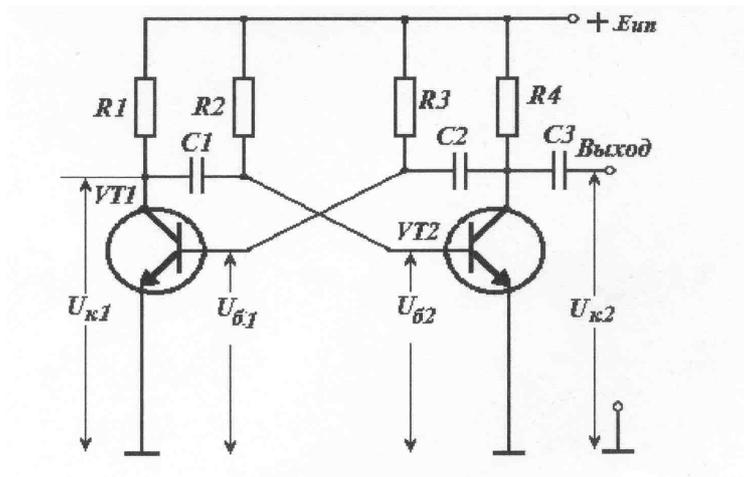


Рисунок 2.

На рис. 2 приведена схема мультивибратора, работающего в автоколебательном режиме. От мультивибратора он отличается тем, что связь между коллектором транзистора VT_2 и базой транзистора VT_1 – емкостная, а резистор R_5 подключен к источнику $+E_n$.

Предположим, что мультивибратор находится в таком состоянии, когда транзистор VT_1 насыщен, конденсатор C_1 разряжен, а конденсатор C_2 заряжен почти до напряжения источника E_n ($U_{C1} = -E_n$). При этом транзистор

VT_2 закрыт, поскольку правая обкладка конденсатора C_1 , соединенная с базой транзистора VT_2 , имеет отрицательный потенциал $-E_k$. Следовательно, мультивибратор находится в состоянии квазиравновесия аналогичном состоянию одновибратора.

Конденсатор C_1 перезаряжается через резистор R_2 и насыщенный транзистор VT_1 : при этом $U_{c1}=U_{б2}$. Конденсатор C_2 заряжается через резистор R_4 и промежуток база-эмиттер транзистора VT_1 до напряжения E_n ($U_{c2}=E_n$). Этот процесс заканчивается через время $t=0,7C_1R_2$ опрокидыванием мультивибратора, так как потенциал базы транзистора VT_2 становится равным нулю. При $C_1=C_2$ время заряда конденсатора C_1 меньше времени разряда конденсатора C_2 , так как $R_4 \ll R_2$, и к моменту, когда $U_{c1}=0$, конденсатор C_2 заряжается до напряжения $U_{c2} = -E_n$.

После опрокидывания мультивибратора схема переходит во второе состояние квазиравновесия, аналогичное первому. В этом состоянии он пребывает в течение времени $t_2 = 0,7C_2R_3$, определяемого процессом перезарядки конденсатора C_2 через резистор R_3 и насыщенный транзистор VT_2 .

По истечении времени $T=t_1+t_2=0,7(C_1R_2+ C_2R_3)$ мультивибратор возвращается в первое состояние квазиравновесия, полностью совпадающее с исходным. Таким образом, устанавливается режим автоколебаний с периодом T . Выходными зажимами мультивибратора могут служить коллектор транзистора VT_1 (или VT_2) и общая точка мультивибратора, напряжение между которыми имеет форму импульсов, близких к прямоугольным. Обычно $R_2= R_3=R$, $C_1=C_2=C$, $R_1= R_4= R_k$ (симметричный мультивибратор), тогда $T=1,4CR$, и скважность импульсов $q=2$.

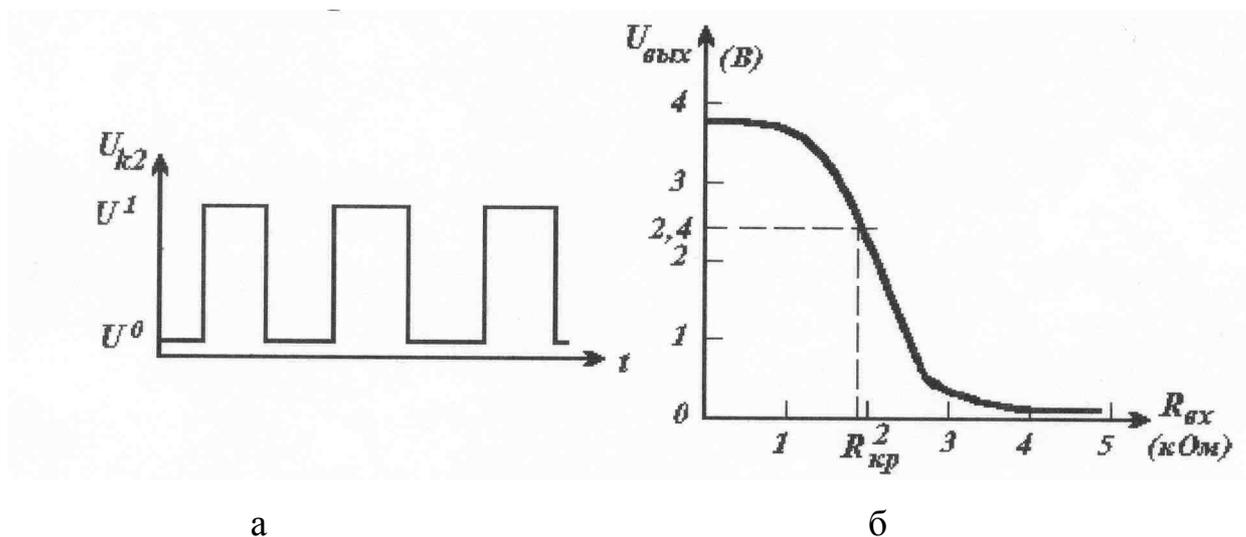


Рисунок 3.

Временные диаграммы (рис. 3а) соответствуют симметричному мультивибратору. Выходное напряжение U_{k2} имеет форму, называемую меандром (скважность $q=2$).

Особенность мультивибраторов в виде микросхем состоит в том, что ввиду трудности получения конденсаторов значительной емкости способами интегральной технологии предусматривается возможность подключения навесных конденсаторов параллельно уже имеющимся в микросхеме. Для этого делают специальные выводы.

Мультивибраторы на ИМС

Мультивибраторы могут быть построены и на логических элементах. Рассмотрим процессы, происходящие в ИМС типа И-НЕ при изменении сопротивления, подключенного между входом логического элемента и общим проводом. Для микросхем серии К155 зависимость выходного напряжения $U_{вых}$ от сопротивления на входе $R_{вх}$ показана на рис. 4б. Из графика видно, что существует критическое значение сопротивления ($R_{вх} = R_{кр} = 1,9 \text{ кОм}$), выводящие логический элемент в активную область; т.е. при $0 \leq R_{вх} \leq 1,8 \text{ кОм}$ на выходе логического элемента будет логическая 1, а при $R_{вх} \geq 2,4 \text{ кОм}$ на выходе будет логический 0. Конечно, величина

сопротивления $R_{кр}$ не является строго постоянной даже для однотипных элементов, на нее влияет разброс параметров ИМС, напряжение источника питания, а также температура окружающей среды.

Теперь рассмотрим процессы, протекающие в ИМС типа И-НЕ при подаче на ее вход через дифференцирующую цепочку R - C скачка напряжения (рис. 4а).

Если значение входного сопротивления $R = R_{вх} < R_{кр}$, то при $U_{вх} = 0$ на выходе будет высокий потенциал $U_{вых} = "1"$ (логическая единица). При подаче на вход схемы скачка напряжения логический элемент переходит из единичного состояния в нулевое.

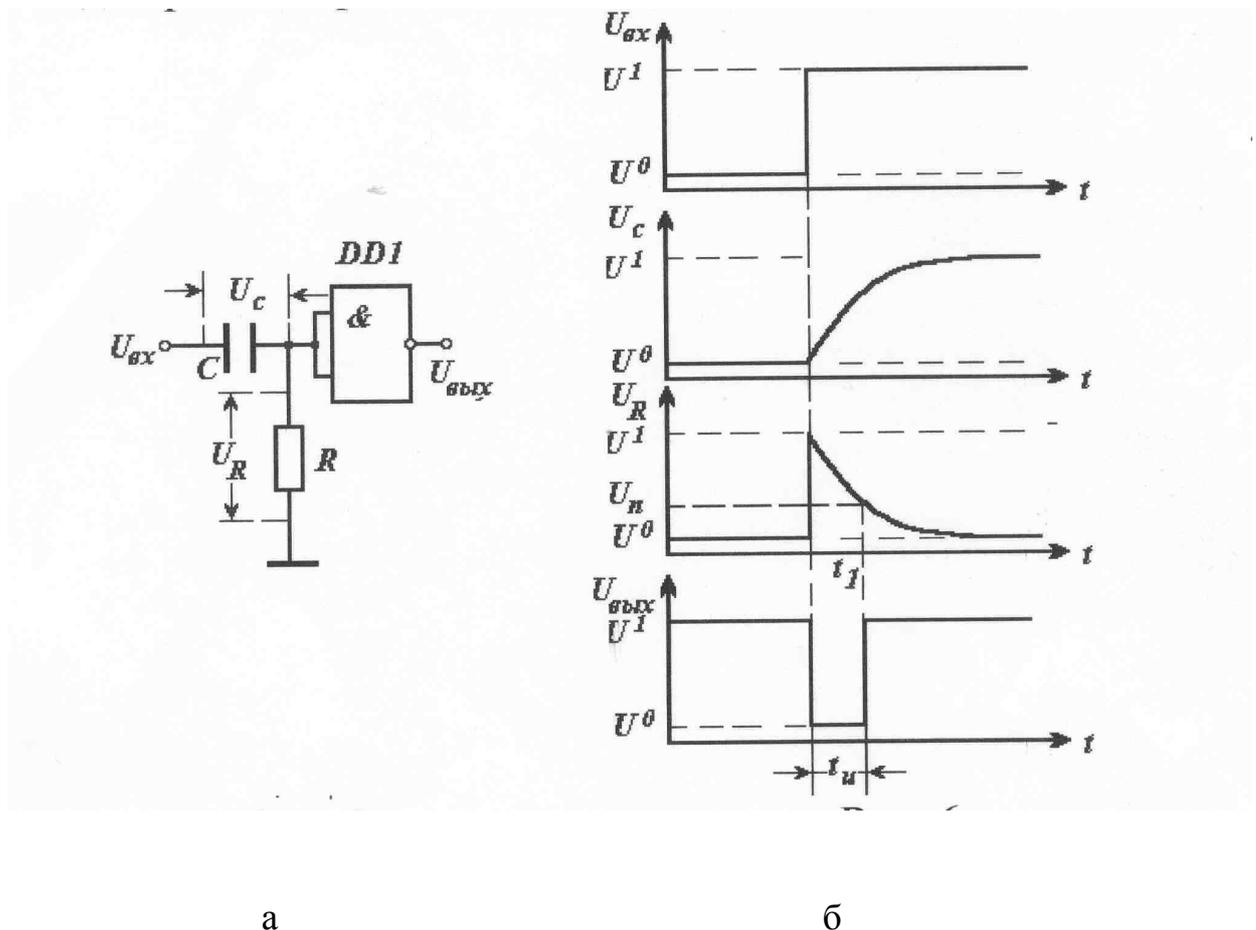


Рисунок 4.

Логический элемент будет находиться в нулевом состоянии в течение времени заряда конденсатора до напряжения на сопротивлении

$U_R = U_{ex} - U_n$, где U_n – пороговое напряжение на входе элемента, при котором логический элемент входит в активную область, т.е. на выходе появляется логическая единица «1» (U_n для серии К155 составляет около 1,15 В). Графики зависимостей напряжений на входе и выходе приведены на рисунке 4б. Если подать на вход цепочки RC высокий уровень входного напряжения U_{ex1} , то происходит рост напряжения U_c на конденсаторе и уменьшение напряжения на входном сопротивлении U_R в момент времени t_1 . Напряжение на входе логического элемента U_R становится меньше порогового U_n и логический элемент И-НЕ возвращается в исходное состояние, т.е. на выходе появляется высокий уровень напряжения (лог. «1»).

МУЛЬТИВИБРАТОРОМ называют РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, вырабатывающий напряжение по форме, близкой к прямоугольной. Такие колебания имеют широкий спектр частоты. Этим определяется название мультивибратора, обозначающее генератор множества колебаний («Мульти» - много).

В импульсных и цифровых устройствах мультивибраторы чаще всего служат ЗАДАЮЩИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ и ФОРМИРОВАТЕЛЯМИ ИМПУЛЬСОВ и работают в одном из следующих режимов:

1) автоколебательном; 2) ждущем; 3) синхронизации и деления частоты.

Мультивибратор, как и триггер, образуется двумя транзисторными ключами (элементами ТТЛ), соединенными между собой входами и выходами. Однако при этом хотя бы одна связь ключей должна быть выполнена через конденсатор. Рассмотрим работу мультивибратора в автоколебательном режиме, когда он служит задающим генератором.

Прибор, позволяющий получить на выходе непрерывную последовательность прямоугольных импульсов, называют задающим генератором-мультивибратором. Мультивибратор можно собрать на двух логических элементах И-НЕ с перекрестной емкостной связью, используя рассмотренный выше принцип. Напряжение с выхода элемента DD1 через

цепочку R_2C_1 подается на вход элемента DD2, а выходное напряжение с элемента DD2 поступает обратно через цепочку R_1C_2 на вход элемента DD1 (рис. 5а).

В такой схеме могут возникнуть колебания прямоугольной формы (рис. 5б) с периодом следования импульсов T равным примерно $T=2,7RC$, если значения R_1 и R_2 лежат в пределах $1\div 1,8$ кОм. Меняя значения R_1 и R_2 , можно плавно регулировать период колебаний мультивибратора.

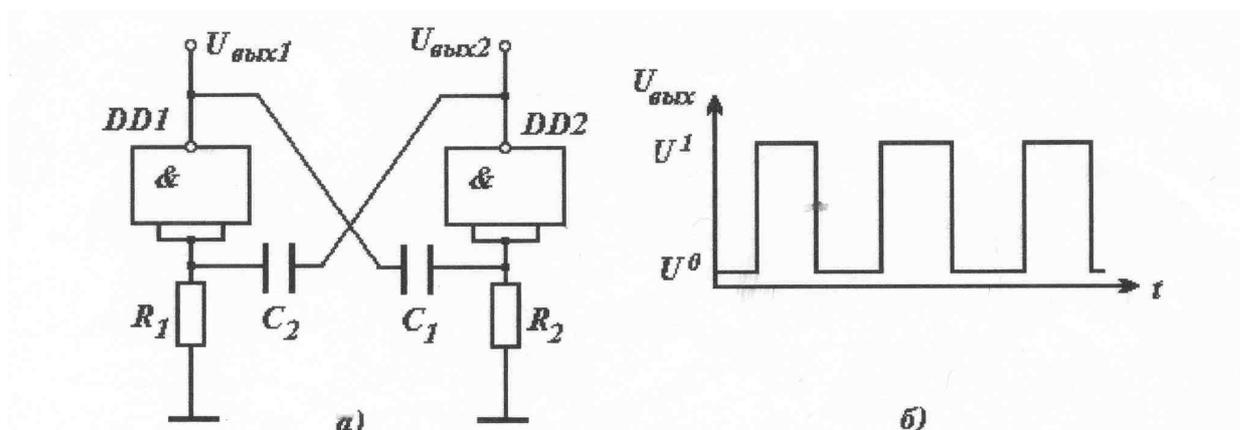


Рисунок 5.

В этом мультивибраторе при включении питания колебания могут и не возникнуть. Это объясняется тем, что при относительно медленном нарастании питания заряд конденсаторов C_1 и C_2 будет происходить медленно, при небольших токах, и возможно, что при этом ни на одном из резисторов R_1 и R_2 напряжение не превысит порогового и оба логических элемента останутся закрытыми.

Поэтому на практике применяют более совершенные мультивибраторы, построенные либо на 3-4 логических элементах, либо с дополнительными обратными связями, либо с использованием пьезоэлектрического кварцевого генератора (рис. 6а, б).

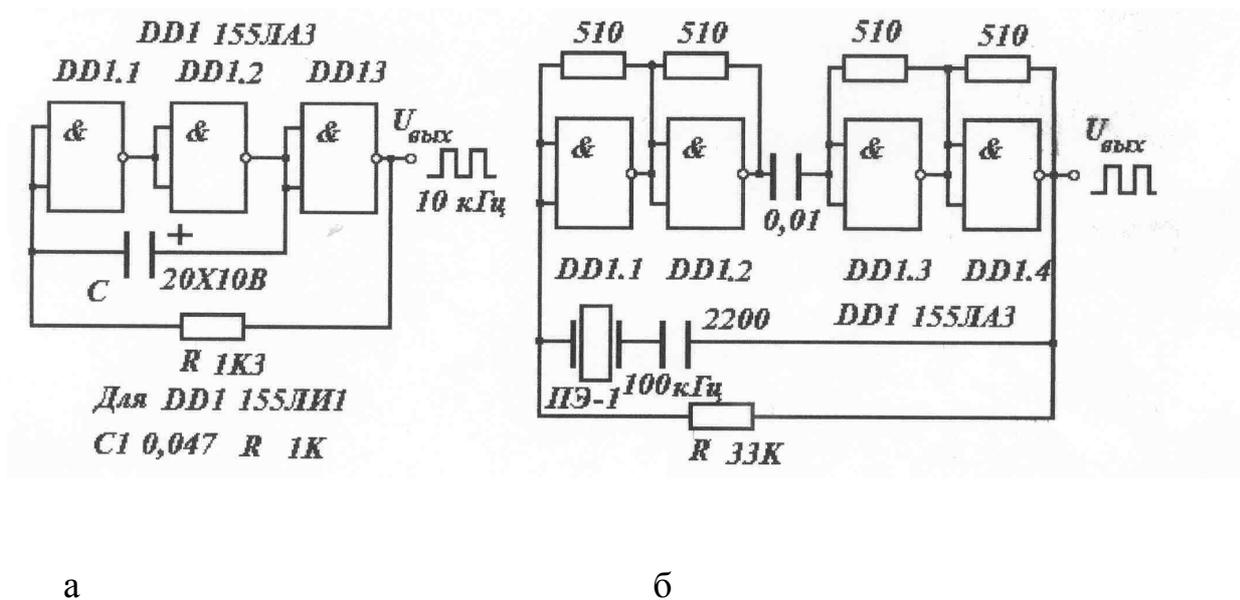


Рисунок 6.

Во всех из приведенных примерах используются ИМС ТТЛ логики типа 133 и 155 серий. Свободные выводы ИМС можно соединить с используемыми, но в этом случае несколько возрастет потребляемый ток. Их можно оставить и свободными, но при этом снижается помехоустойчивость.

Иногда неиспользуемые входы подключают к источнику питания через резистор $1 \div 5$ кОм, через один резистор допускается подключать до 20 свободных выходов. Наиболее часто используют 1 вариант, так как в этом случае не требуется вводить в устройство дополнительные навесные элементы.

Ждущий мультивибратор

Другой режим работы мультивибратора – ждущий режим. В цифровой и импульсной технике часто применяют импульсные устройства, которые после их запуска вырабатывают нормированный выходной импульс заданной длительности и высоты. Таким устройством является **ОДНОСТАБИЛЬНЫЙ МУЛЬТИВИБРАТОР** (одновибратор), называемый

также ЖДУЩИМ МУЛЬТИВИБРАТОРОМ, одноконтным релаксатором или стартстопным мультивибратором.

От обычного мультивибратора он отличается тем, что работает не в режиме колебаний: одновибратор вырабатывает один выходной импульс при подаче на его вход запускающего импульса. Функциональная схема одновибратора на 2 элемента И-НЕ, который управляется импульсами отрицательной полярности, имеет вид, показанный на рисунке 7а.

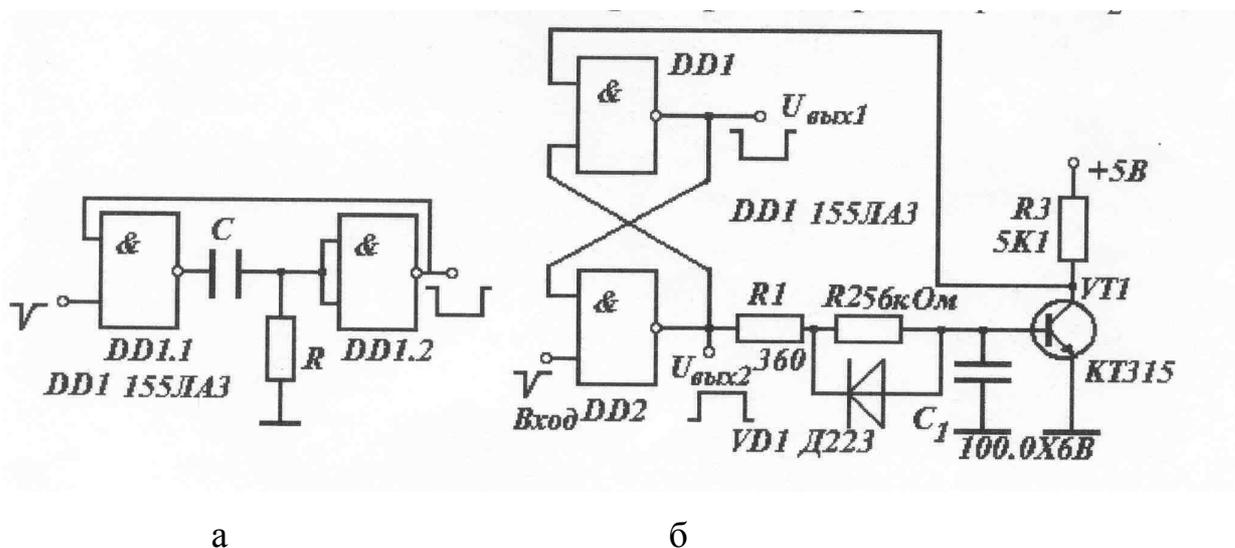


Рисунок 7.

Длительность импульсов τ_u на выходе одновибратора задается емкостью C и регулируются резистором R (при $C=5\div 100$ мкФ и $R=10\div 90$ кОм $\tau_u = 0,4\div 2$ с). В начальном состоянии на выходе элемента DD2 логическая 1, которая подается на вход DD1 на другой вход DD1 также подан высокий уровень напряжения, тогда на выходе DD1 логический 0, который подан на входы элемента DD2. При кратковременной подаче на вход DD1 логического нуля элемент DD1 переходит в единичное состояние, т.е. на вход логического элемента И-НЕ через дифференцирующую цепочку RC поступает положительный скачок напряжения.

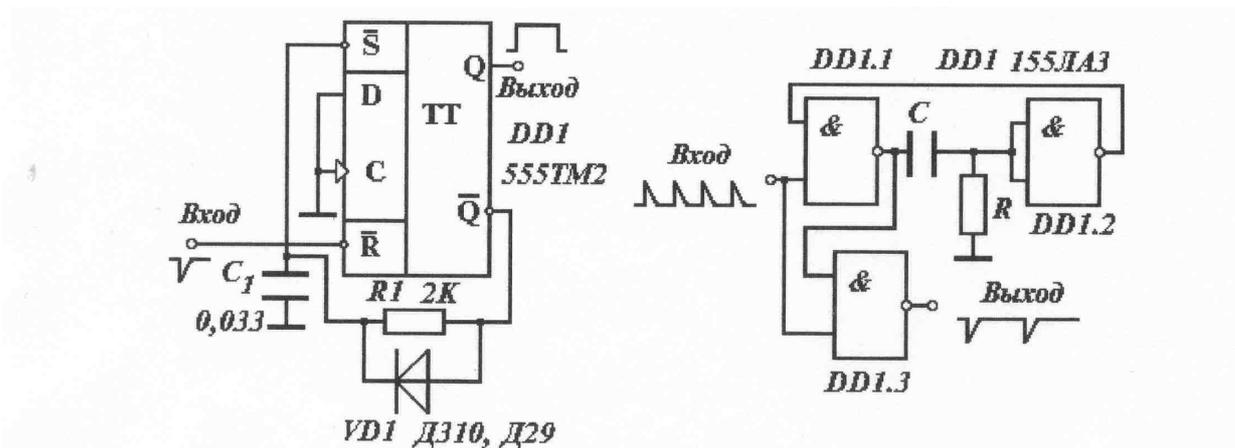
На выходе элемента DD2 формируется отрицательный прямоугольный импульс, длительность которого τ_u определяется временем

заряда конденсатора C и временем уменьшения напряжения на сопротивлении R до порогового напряжения U_n , при котором происходит переход элемента DD2 в единичное состояние.

ФОРМИРОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ можно построить на R-S-триггере, содержащем 2 логических элемента 2И-НЕ, интегрирующую цепь и инвертор на транзисторе VT1 (рис. 7б). Если на входе формирователя высокий логический уровень 1, то на выходе 1 будет высокий логический уровень, а на выходе 2 низкий (транзистор VT1 при этом заперт). При поступлении на вход кратковременного нуля (например: замыкание кнопкой входа на нуль) триггер переключается в другое состояние: на выходе DD2 появляется логическая 1, а на выходе DD1 – логический 0. При этом через резисторы R_1 и R_2 начинает заряжаться конденсатор $C1$. Как только напряжение на нем достигнет напряжения открывания транзистора VT1, напряжение на коллекторе транзистора уменьшится до логического 0, триггер возвращается в исходное состояние и конденсатор $C1$ разряжается. Диод VD1 ускоряет разряд конденсатора $C1$, а резистор $R1$ ограничивает ток разряда.

Ориентировочно длительность импульса в секундах равна произведению емкости (в мкФ) на сопротивление резистора $R2$ (в МОм). Повторная подача логического 0 на вход элемента DD2 во время длительности импульса (пока длится заряд конденсатора) не влияет на работу формирователя одиночного импульса.

ЖДУЩИЙ МУЛЬТИВИБРАТОР (одновибратор) для получения коротких импульсов можно собирать и на более сложных триггерах, например, на D-триггерах (рис. 8а).



а

б

Рисунок 8.

Сигнал подается на S-вход D-триггера. Пусть в исходном состоянии на входе S одновибратора высокий уровень напряжения (логическая 1.), на прямом выходе логический 0, а на инверсном выходе \bar{Q} логическая 1. Выходы D и C заземлены. При подаче на S-вход триггера кратковременного логического 0 D-триггер переходит в единичное состояние, на выходе Q появляется логическая 1, на инверсном выходе \bar{Q} логический 0. Конденсатор C_1 начинает разряжаться через резистор R1 до напряжения логического 0 и триггер опять переходит в нулевое состояние, ибо на R-входе будет логический 0. После этого логическая 1 с инверсного выхода \bar{Q} поступает на R-вход и одновибратор возвращается в исходное состояние. Цепочкой $R_1 C_1$ регулируют длительность импульса, диод VD1 формирует крутой фронт импульса. Данный одновибратор формирует короткие положительные импульсы на выходе Q.

ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. На базе микросхемы К155ЛА1, которая состоит из двух логических элементов И–НЕ с 4 входами и одним выходом на каждом, построить одновибратор. Схема одновибратора приведена на рис. 4а. Навесные элементы схемы выдаются преподавателем.

2. На вход одновибратора подать единичный импульс. В режиме «Характеристика сигнала» исследовать форму выходного сигнала, определить параметры сигнала: период, амплитуду. Изменить параметры R и C и проделать ту же процедуру.

3. Собрать схему простейшего мультивибратора согласно рис. 5. Изменять параметры RC цепей, определить параметры сигнала. Установить при каких условиях мультивибратор вырабатывает импульсы со скважностью $q=2$.

4. Собрать схему ждущего мультивибратора (одновибратора) согласно рис.7а. На вход подать импульс отрицательной полярности. Исследовать форму выходного сигнала и подобрать параметры конденсатора и резистора таким образом, чтобы форма выходного импульса была наиболее близка к прямоугольной.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие генераторы называются релаксационными? Перечислить возможные режимы работы релаксационных генераторов.

2. Какой генератор называют мультивибратором? Какой генератор является одновибратором.

3. Привести схему простейшего мультивибратора. Кратко описать принцип его работы.

4. Привести схему простейшего одновибратора. Кратко описать принцип его работы.

5. Зарисовать схему мультивибратора на интегральных схемах И-НЕ. Кратко описать принцип его работы.

ЛИТЕРАТУРА

[3] - §3.8; [4] - §5.5; [5] - §4.7

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.И. Манаев. Основы радиоэлектроники. М.: Советское радио. 1976. –480 с.
2. А.И. Кучумов. Электроника и схемотехника. М.: “Гелиос АРВ”. 2002. –304 с.
3. В.И. Лачин, Н.С. Савелов. Электроника. Ростов н/Д: изд-во “Феникс”. 2000. -448 с.
4. В.И. Нефедов. Основы радиоэлектроники. М.: Высшая школа, 2000. - 399 с.
5. М.М. Мэндл. 200 избранных схем электроники. М.: 1980. -344 с.
6. Л.З. Бобровников. Радиотехника и электроника. М.: «Недра», 1974.-360с.
7. С.И. Баскаков. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 1988.-448с.