

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет радиотехники и электроники

Кафедра радиотехнических систем

Т. Н. Дворникова

***ВВЕДЕНИЕ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКУ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ***

*Рекомендовано УМО по образованию
в области информатики и радиоэлектроники в качестве
учебно-методического пособия для специальностей
1-39 01 02 «Радиоэлектронные средства»,
1-39 01 04 «Радиоэлектронная защита информации»*

Минск БГУИР 2016

УДК 621.396.6(076.5)
ББК 32.844я73
Д24

Рецензенты:

кафедра информационно-измерительной техники и технологий
Белорусского национального технического университета
(протокол №12 от 10.03.2015);

проректор по производственному обучению учреждения образования
«Белорусская государственная академия связи»,
кандидат технических наук, доцент Е. В. Новиков

Дворникова, Т. Н.

Д24 Введение в радиоэлектронику. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие / Т. Н. Дворникова. – Минск : БГУИР, 2016. – 84 с. : ил.
ISBN 978-985-543-180-1.

Состоит из семи лабораторных работ и предназначен для изучения и исследования сигналов и радиотехнических устройств, а также приобретения практических навыков физического макетирования и исследования радиотехнических схем на лабораторном стенде IDL-800 с использованием контрольно-измерительных приборов и пакетов прикладных программ электронных систем моделирования Multisim, MatLab.

Содержит теоретические сведения по проектированию и применению наиболее распространенных радиотехнических узлов и устройств.

УДК 621.396.6(076.5)
ББК 32.844я73

ISBN 978-985-543-180-1

© Дворникова Т. Н., 2016

© УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», 2016

Содержание

<i>Лабораторная работа №1. Изучение лабораторного универсального стенда IDL-800</i>	4
<i>Лабораторная работа №2. Изучение электронной системы моделирования MatLab. Спектры модулированных сигналов в MatLab</i>	14
<i>Лабораторная работа №3. Исследование характеристик источников сигналов в среде Multisim</i>	35
<i>Лабораторная работа №4. Исследование характеристик пассивных линейных радиотехнических цепей</i>	47
<i>Лабораторная работа №5. Исследование воздействия радиосигналов на линейный усилитель</i>	63
<i>Лабораторная работа №6. Исследование дискретных сигналов</i>	68
<i>Лабораторная работа №7. Исследование работы типовых радиоэлектронных блоков</i>	71
<i>Литература</i>	84

Лабораторная работа №1

ИЗУЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО СТЕНДА IDL-800

1.1. Цель работы

Исследование видов и параметров радиотехнических сигналов. Изучение методов осциллографических измерений и приобретение практических навыков работы с осциллографом.

1.2. Методические указания по выполнению лабораторной работы

Теоретические сведения

Сигнал – это любая физическая величина (например: температура, давление воздуха, интенсивность света, сила тока и т. д.), изменяющаяся со временем. Именно благодаря этому изменению сигнал может нести в себе какую-то информацию.

Электрическое колебание, содержащее сообщение, называется **электрическим сигналом**.

Детерминированный сигнал – это сигнал, параметры которого в заданный момент времени известны со 100%-й вероятностью.

Случайный сигнал – это сигнал, параметры которого можно определить с вероятностью меньше 100 %.

Пример: белый шум.

Периодический сигнал – это сигнал, значение которого повторяется через определенные равные промежутки времени, называемые периодом повторения сигнала, или периодом.

Для **непериодического** это условие не выполняется.

Управляющие сигналы – это сравнительно низкочастотные колебания, которые содержат полезную информацию, но непригодны для непосредственной передачи в эфир с помощью радиоволн.

Аналоговый сигнал – это сигнал, который может принимать любые значения в определенных пределах (например, напряжение может плавно изменяться в пределах от 0 до 10 В).

Цифровой сигнал – это сигнал, который может принимать только два (иногда три) значения, причем разрешены некоторые отклонения от этих значений. Например, напряжение может принимать два значения: от 0 до 0,5 В (уровень нуля) или от 2,5 до 5 В (уровень единицы).

Дискретный по времени – это сигнал, параметры которого непрерывны по величине и дискретны по времени.

Дискретный по уровню – это сигнал, параметры которого непрерывны по времени, но дискретны по величине. Такие сигналы можно получить из непрерывных путем квантования их по уровню.

Немодулированные ВЧ-колебания способны распространяться на большие расстояния, но не несут полезной информации.

Модулированные сигналы – это высокочастотные колебания, один или несколько параметров которых изменяются по закону управляющего сигнала. ВЧ-колебания в отличие от низкочастотных сигналов иногда называют радиосигналами.

В общем случае модулированный сигнал можно представить как

$$S(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi(t)), \quad (1.1)$$

где U_m – амплитуда сигнала;

ω – угловая частота;

φ – начальная фаза.

Виды простых периодических сигналов

Простейшим периодическим сигналом является гармоническое колебание (рис. 1.1):

$$U(t) = U_m \cdot \sin \omega \cdot t \quad (1.2)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \quad (1.3)$$

$$T = \frac{1}{f}, \quad (1.4)$$

где U_m – амплитудное значение сигнала;

ω – угловая частота;

f – частота сигнала;

T – период сигнала.

Частота электрического сигнала (f) – это количественная мера, характеризующая скорость изменения направления электрического тока (напряжения).

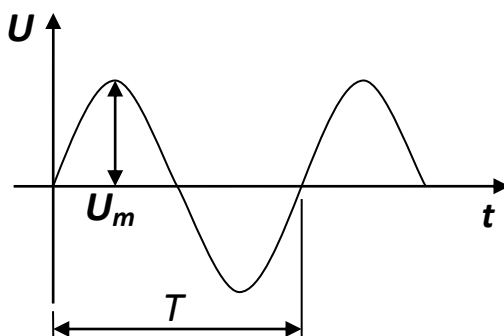


Рис. 1.1. Синусоидальный сигнал

Угловая частота (круговая, циклическая) (ω) определяет скорость изменения вектора фазы электрического (магнитного) поля.

Частота электрического сигнала определяет скорость изменения направления электрического тока (количество раз или колебаний) в секунду. Единица измерения частоты – герц (Гц).

Период электрического сигнала (T) – величина, обратная частоте, показывающая, в течение какого времени электрический сигнал совершает одно циклическое колебание.

Длина волны (λ) – это размерная величина, характеризующая один период колебания электромагнитного поля в пространстве:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f}. \quad (1.5)$$

Прямоугольный сигнал – это сигнал, имеющий прямоугольную форму (рис. 1.2) составляющих его импульсов, амплитуда которых постоянна (одинакова).

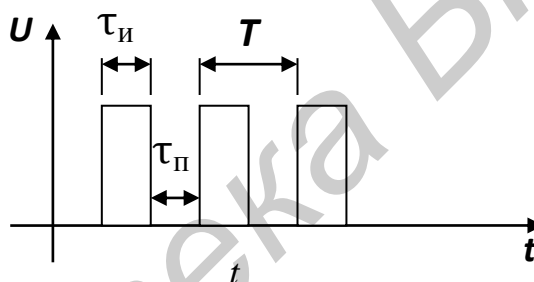


Рис. 1.2. Прямоугольный сигнал

Прямоугольный сигнал также характеризуется скважностью.

Скважность – это отношение периода следования импульсов к их длительности:

$$Q = \frac{T}{\tau_{и}}, \quad (1.6)$$

где $\tau_{и}$ – длительность импульса.

Меандр – это периодический сигнал прямоугольной формы, длительность импульса и длительность паузы которого равны. То есть скважность такого сигнала равна 2:

$$\tau_{и} = \tau_{п}. \quad (1.7)$$

Пилообразный сигнал – это сигнал, имеющий пилообразную форму составляющих его импульсов (рис. 1.3), амплитуда и частота следования импульсов которого постоянна.

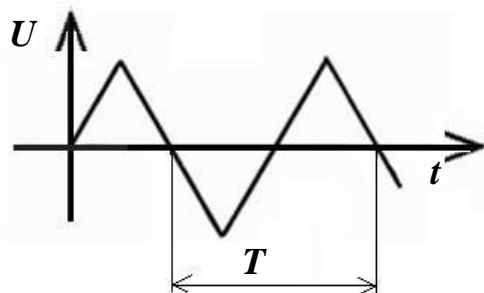


Рис. 1.3. Пилообразный сигнал

Техника осциллографических измерений

Осциллограф является универсальным измерительным прибором широкого применения.

Осциллограф предназначен для работы в составе любой сертифицированной ПЭВМ типа IBM PC.

На лицевой панели осциллографа В-421 имеются четыре стандартных разъема типа СР-50.73Ф (BNC-J) (рис. 1.4):

- ⊕ «КАНАЛ 1» – сигнальный вход канала 1 для подключения пробника;
- ⊕ «КАНАЛ 2» – сигнальный вход канала 2 для подключения пробника;
- ⊕ «СИНХР» – вход синхронизации для подключения кабеля внешней синхронизации;
- ⊕ «ЦАП» – сигнальный выход канала цифроаналогового преобразователя (генератора сигналов).



Рис. 1.4. Лицевая панель осциллографа В-421

На лицевой панели осциллографов также расположен индикаторный светодиод, который имеет цвет свечения: красный – при включенном питании (внешний сетевой адаптер включен в сеть), желтый – в рабочем режиме (после запуска программы).

На задней панели осциллографов находятся разъем для подключения соединительного кабеля интерфейса USB, с помощью которого

осуществляется связь с компьютером, и разъем для подключения питания от внешнего сетевого адаптера.

При загрузке программного пакета на мониторе появляется картинка *лицевой панели* осциллографа с экраном и органами управления в виде элементов графического пользовательского интерфейса.

На лицевой панели (рис. 1.5) присутствуют следующие элементы. В верхней части окна расположены (последовательно сверху вниз) *заголовок окна, строка меню и панель инструментов*. Ниже находится *рабочий экран* осциллографа, слева от которого расположена *экранная панель*, справа – *панель регулировки уровней нуля и синхронизации*. Под экраном находится *панель информации курсоров*. Замыкает лицевую панель расположенная в самом низу *строка состояния*.

Заголовок окна и строка меню – стандартный элемент любого приложения Windows. В заголовке окна присутствуют названия программы и текущих данных.

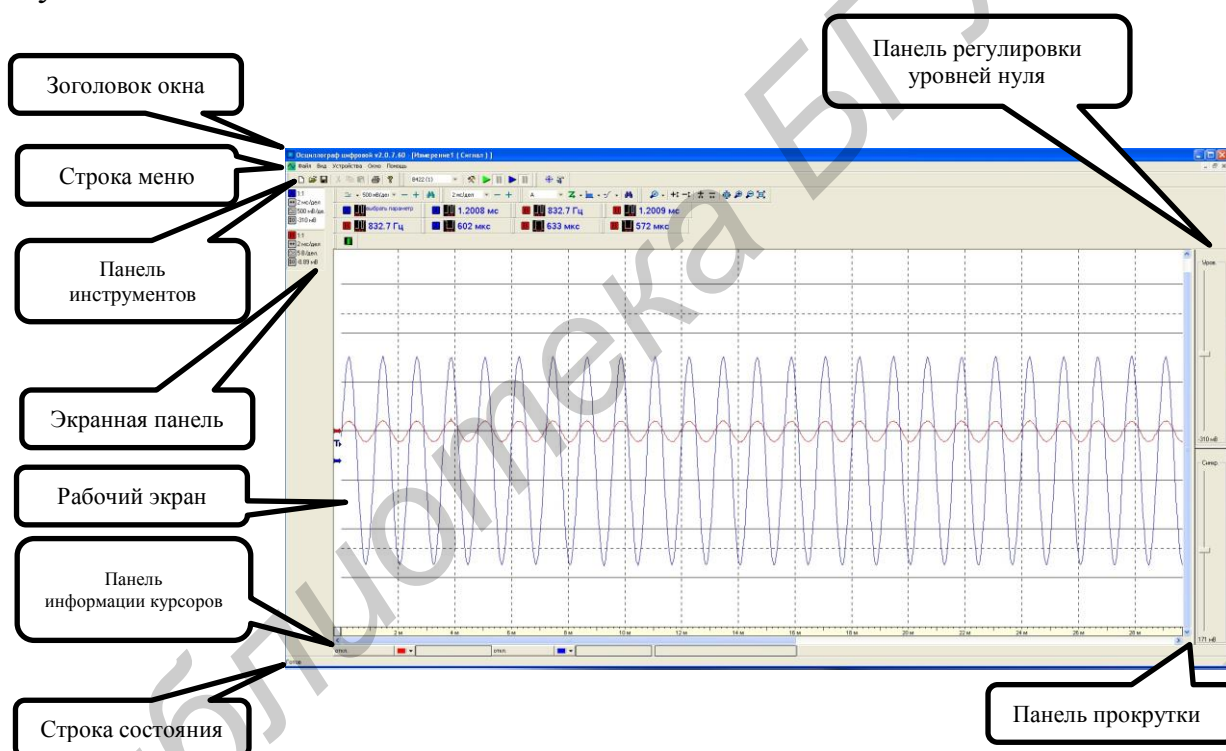


Рис. 1.5. Лицевая панель осциллографа на экране монитора

Из каналов, отображаемых на экране монитора, только для одного могут быть проведены курсорные измерения, изменение уровня нуля и развертки по амплитуде. Канал, для которого в данный момент могут производиться вышеперечисленные действия, называют активным. Выбор конкретного канала производится с помощью мыши. Для этого необходимо поместить маркер в окно канала на **Экранной панели** и щелкнуть левой кнопкой мыши. Окно активного канала подсвечено белым цветом.

Осциллограф позволяет автоматически «находить» сигнал, т. е. устанавливать режимы измерения таким образом, что сигнал на экране монитора принимает удобный для работы размах по вертикали для обоих каналов и по горизонтали для активного канала. Для включения режима **Автопоиск** необходимо:

1. Установить в активное состояние тот канал, к которому подключен источник сигнала (канал А или В).
2. Установить источник синхронизации – внутренний (канал А или В).
3. Нажать кнопку **Поиск сигнала** на **Панели инструментов** или выполнить команду меню *Устройства/Поиск сигнала*.

Осциллограф позволяет автоматически производить измерение 22 параметров регистрируемого сигнала.

Выбор измеряемого параметра осуществляется в диалоговом окне **Параметры**, открываемом при нажатии на **Панель параметров** соответствующего канала.

В разделе **Область измерения** выбирается область сигнала, в рамках которой будет вычисляться параметр (рис. 1.6):

1. *Память* – весь регистрируемый сигнал в пределах длины развертки.
2. *Между курсорами* – область между двумя курсорами, поставленными пользователем.
3. *Период* – вычисление за один период сигнала (для периодических сигналов).

В поле **Усреднение** задается число циклов измерений, по которым будет усредняться вычисляемый параметр сигнала.

В поле **Канал** выбирается входной канал для сигнала, по которому будут вычисляться параметры.

После выбора параметра, задания области сигнала и числа усреднений надо нажать кнопку **ОК**.

Величина параметров регистрируемых сигналов отображается на панели инструментов (см. рис. 1.5).

Для просмотра параметров «замороженного» канала необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по окну соответствующего «замороженного» канала на **Экранной панели**. После этого на экране откроется окно **Параметры замороженного канала**, которое содержит результаты автоматического измерения параметров данного сигнала, а также **Общие параметры** – *Развертка, Размах, Смещение нуля* на **Панели инструментов**. Запоминается сигнал активного канала.

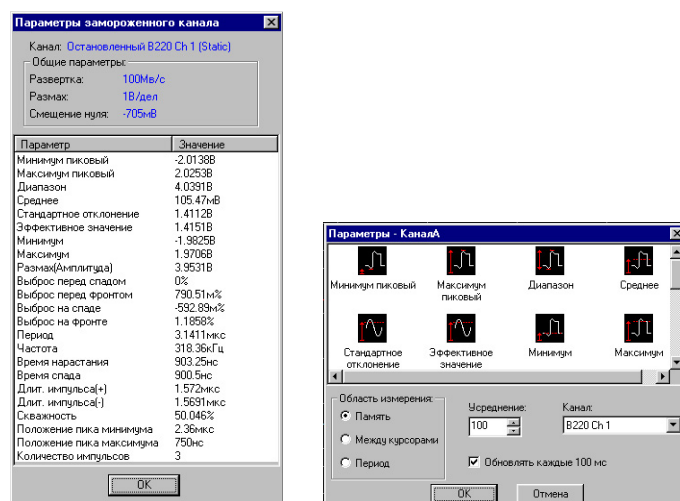


Рис. 1.6. Параметры каналов

Режим анализатора спектра

Для работы в режиме анализатора спектра необходимо после запуска программы или при создании нового «документа» в открывшемся диалоговом окне **Выбор и настройка каналов** (рис. 1.7) выбрать форму представления регистрируемого сигнала – БПФ (в окне *Tun*).

В разделе **Свойства преобразования** необходимо задать требуемые параметры.

В программе реализовано два вида усреднения:

1. *Плавающее* – усреднение проводится по последним n циклам измерения, указанным в окне *циклов* (по принципу очереди – последнее вычисленное данное вытаскивает первое). Сигнал на экране обновляется после каждого цикла измерения.

2. *Накопительное* – усреднение проводится по каждым n циклам измерения, указанным в окне *циклов*. Сигнал на экране обновляется после n циклов измерения.

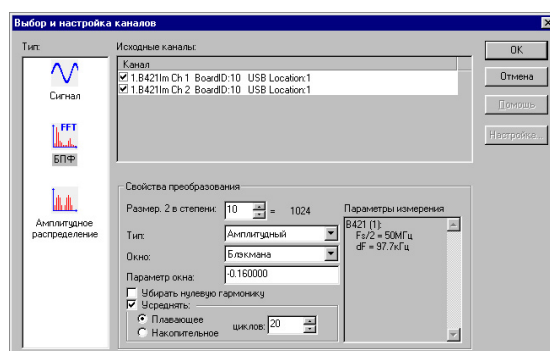


Рис. 1.7. Выбор и настройка каналов

Следует учесть значительно меньшую динамику отображения при большем количестве циклов.

В окне **Параметры измерения** отображаются значения $F_s/2$ (частота Найквиста) и dF (шаг квантования по частоте). Если размер БПФ превышает количество отсчетов, выбранных в сегменте данных, выводится сообщение: **«Размер БПФ превышает размер сегмента данных!»**. В этом случае данные дополняются нулями до размера БПФ.

Универсальная лабораторная установка IDL-800 DigitalLab

Лабораторная установка IDL-800 (рис. 1.8) предназначена для физического макетирования и исследования функционирования цифровых логических устройств, а также может быть использована для исследования аналоговых устройств.

Лабораторная установка содержит источники постоянного напряжения, функциональный генератор, цифровой вольтметр, восьмиразрядный светодиодный дисплей, два семисегментных индикатора и логические переключатели. В лабораторную установку входит наборная плата AD-200, на которой собираются исследуемые устройства. Детализация лабораторной установки показана на рис. 1.8.

1. Наборная плата AD-200 (рис. 1.9) для моделирования исследуемых устройств имеет 1896 контактов. Расстояния между контактами и размер контактов позволяют вставлять в плату DIP-компоненты, а также транзисторы, резисторы, конденсаторы и т. п.

Соединения между компонентами осуществляются с помощью проводов диаметром 0,3–0,8 мм.

2. Регулируемые источники электропитания 0...+15 В и 0...–15 В с максимальным выходным током 300 мА.

3. Нерегулируемый источник электропитания +5 В с максимальным выходным током 1 А.

4. Нерегулируемый источник электропитания –5 В с максимальным выходным током 100 мА. Все источники электропитания имеют защиту от короткого замыкания.

5. Функциональный генератор, формирующий синусоидальный, или треугольный, или меандровый сигнал в диапазонах частот: 1 – 10 Гц, 10 – 100 Гц, 100 Гц – 1кГц, 1 – 10 кГц, 10 – 100 кГц с плавной регулировкой частоты внутри диапазонов. Амплитуда синусоидального сигнала регулируется в пределах от 0 до 4 В. Амплитуда двуполярного треугольного сигнала регулируется в пределах от 0 до 3 В. Амплитуда двуполярного меандрового сигнала регулируется в пределах от 0 до 4 В.

6. Цифровой вольтметр имеет четыре диапазона измерений:

- 0 – 199,9 В;
- 0 – 19,99 В;
- 0 – 1,999 В;
- 0 – 199,9 мВ.

Входное сопротивление: 10 МОм в любом диапазоне.

Внимание. Цифровой вольтметр не имеет защиты от перегрузки.

7. Два функциональных переключателя $-5\text{ В}/0\text{ В}/+5\text{ В}$.

8. Две антидребезговые кнопки для генерирования одиночных импульсов с прямым и инверсным выходами.

9. Восемь переключателей логических уровней «0»/«1».

10. Два семисегментных индикатора, включенных по схеме с общим катодом.

11. Дисплей на восьми буферизированных светодиодах.

12. Четырехточечный адаптер для подключения измерительных приборов.

13. Контакты общей шины лабораторной установки.

Определить частоту и амплитуду сигналов с помощью осциллографа, выполнить математическую обработку результатов эксперимента.

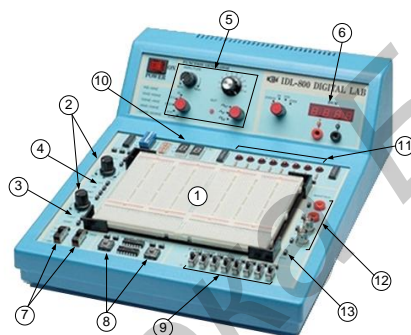


Рис. 1.8. Лабораторная установка IDL-800 DigitalLab

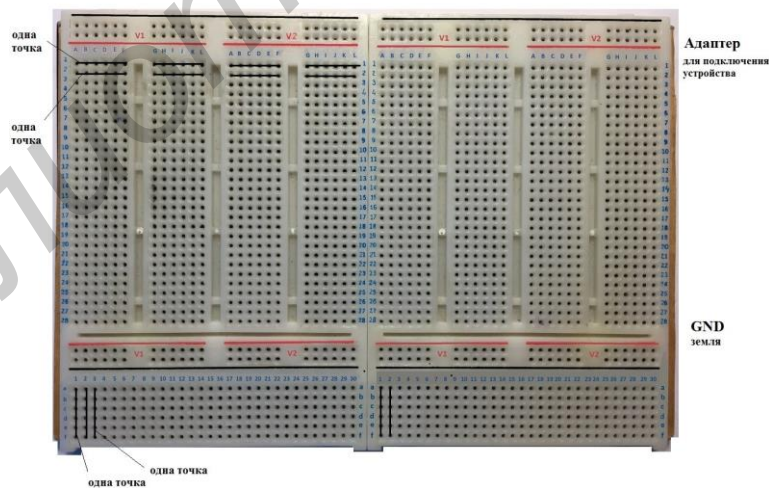


Рис. 1.9. Наборная плата AD-200

Задание 1

От генератора подать на осциллограф синусоидальный сигнал. Определить его параметры с помощью осциллографа. Выполнить

математическую обработку результата эксперимента и привести графические представления результатов наблюдения.

Задание 2

От генератора подать на осциллограф треугольный сигнал. Определить его параметры с помощью осциллографа. Выполнить математическую обработку результата эксперимента и привести графические представления результатов наблюдения.

Задание 3

От генератора подать на осциллограф прямоугольный сигнал. Определить его параметры с помощью осциллографа. Выполнить математическую обработку результата эксперимента и привести графические представления результатов наблюдения.

1.3. Приборы и оборудование

Универсальная лабораторная установка IDL-800 Digital Lab; цифровой осциллограф БОРДО; соединительные провода. Персональный компьютер.

1.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы измерительных установок.
3. Математическая обработка результатов эксперимента.
4. Графическое представление результатов наблюдений.
5. Анализ полученных результатов.

1.6. Контрольные вопросы

1. Амплитуда сигнала и методика ее измерения.
2. Виды сигналов.
3. Что такое скважность сигнала?
4. Какие измерения можно производить с помощью осциллографа?
5. Как с помощью осциллографа получить фигуру Лиссажу?

Рабочая среда MatLab содержит следующие элементы:

- панель инструментов с кнопками и раскрывающимся списком;
- окно с вкладками **Launch Pad** и **Workspace**, из которого можно получить доступ к различным модулям ToolBox и к содержимому рабочей среды;
- окно с вкладками **Command History** и **Current Directory**, предназначенное для просмотра и повторного вызова ранее введенных команд, а также для установки текущего каталога;
- командное окно, в котором находится приглашение к вводу `»`, и мигающий вертикальный курсор;
- строку состояния.

Если в рабочей среде MatLab версии 6.x отсутствуют некоторые окна, приведенные на рис. 2.2, то следует в меню **View** выбрать соответствующие пункты: **Command Window**, **Command History**, **Current Directory**, **Workspace**, **Launch Pad**.

Команды следует набирать в командном окне. Символ `»`, обозначающий приглашение к вводу командной строки, набирать не нужно. Для просмотра рабочей области удобно использовать полосы скроллинга или клавиши **Home**, **End** для перемещения влево или вправо и **PageUp**, **PageDown** для перемещения вверх или вниз. Если вдруг после перемещения по рабочей области командного окна пропала командная строка с мигающим курсором, просто нажмите **Enter**.

Важно помнить, что набор любой команды или выражения должен заканчиваться нажатием **Enter**, для того чтобы программа MatLab выполнила эту команду или вычислила выражение.

Сохранение рабочей среды. М-файлы. Самый простой способ сохранить все значения переменных – использовать в меню **File** пункт **Save Workspace As**. При этом появляется диалоговое окно **Save Workspace Variables**, в котором следует указать каталог и имя файла. По умолчанию предлагается сохранить файл в подкаталоге *work* основного каталога MatLab. Программа сохранит результаты работы в файле с расширением *mat*. Теперь можно закрыть MatLab.

М-файлы. Работа из командной строки MatLab затрудняется, если требуется вводить много команд и часто их изменять. Ведение дневника при помощи команды *diary* и сохранение рабочей среды незначительно облегчают работу. Самым удобным способом выполнения групп команд MatLab является использование М-файлов, в которых можно набирать команды, выполнять их все сразу или частями, сохранять в файле и использовать в дальнейшем. Для работы с М-файлами предназначен редактор М-файлов. С его помощью можно создавать собственные функции и вызывать их, в том числе и из командного окна.

Раскройте меню **File** основного окна MatLab и в пункте **New** выберите подпункт **M-file**. Новый файл откроется в окне редактора М-файлов, которое изображено на рис. 2.3.

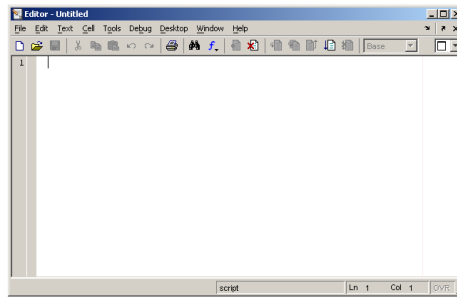


Рис. 2.3. Окно редактора М-файлов

М-файлы в MatLab бывают двух типов: файл-программы (*Script M-Files*), содержащие последовательность команд, и файл-функции (*Function M-Files*), в которых описываются функции, определяемые пользователем.

Файл-программа. Наберите в редакторе команды, приводящие к построению двух графиков в одном графическом окне (рис. 2.4).

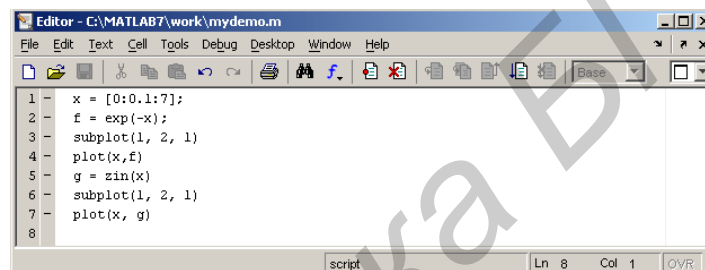


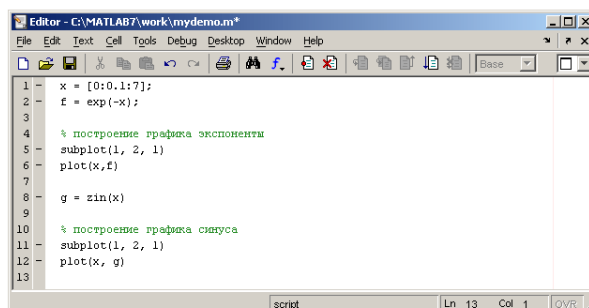
Рис. 2.4. Файл-программа

Сохраните теперь файл с именем mydemo.m в подкаталоге work основного каталога MatLab, выбрав пункт **Save as** в меню **File** редактора. Для запуска на выполнение всех команд, содержащихся в файле, следует выбрать пункт **Run** в меню **Debug**. На экране появится графическое окно *Figure 1*, содержащее графики функций.

Команды файл-программы осуществляют вывод в командное окно. Для подавления вывода следует завершать команды точкой с запятой. Если при наборе сделана ошибка и MatLab не может распознать команду, то происходит выполнение команд до неправильно введенной, после чего выводится сообщение об ошибке в командное окно.

Очень удобной возможностью, предоставляемой редактором М-файлов, является выполнение части команд. Закройте графическое окно *Figure 1*. Выделите при помощи мыши, удерживая левую кнопку, или клавишами со стрелками при нажатой клавише **Shift** первые четыре команды и выполните их из пункта **Text**. Обратите внимание, что в графическое окно вывелся только один график, соответствующий выполненным командам. Запомните, что для выполнения части команд их следует выделить и нажать клавишу **F9**.

Отдельные блоки М-файла можно снабжать комментариями, которые пропускаются при выполнении, но удобны при работе с М-файлом. Комментарии начинаются со знака процента и автоматически выделяются зеленым цветом (рис. 2.5).



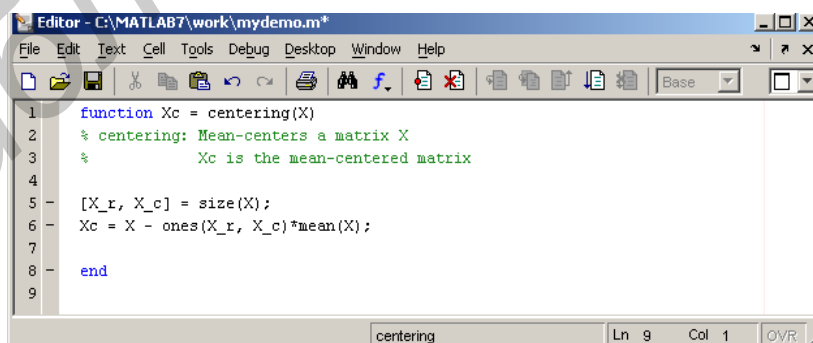
```
Editor - C:\MATLAB7\work\mydemo.m*
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 - x = [0:0.1:7];
2 - f = exp(-x);
3
4 - % построение графика экспонента
5 - subplot(1, 2, 1)
6 - plot(x,f)
7
8 - g = sin(x)
9
10 - % построение графика синуса
11 - subplot(1, 2, 1)
12 - plot(x, g)
13
script Ln 13 Col 1 OVR
```

Рис. 2.5. Код программы с вставленными комментариями

Открытие существующего М-файла производится при помощи пункта **Open** в меню **File** рабочей среды либо редактора М-файлов.

Файл-функция. Рассмотренная выше файл-программа является только последовательностью команд MatLab, она не имеет входных и выходных аргументов. Для использования численных методов и при программировании собственных приложений в MatLab необходимо уметь составлять файл-функции, которые производят необходимые действия с входными аргументами и возвращают результат действия в выходных аргументах. Разберем несколько простых примеров, позволяющих понять работу с файл-функциями.

Проводя предобработку данных многомерного анализа хемометрики, часто применяют центрирование. Имеет смысл один раз написать файл-функцию, а потом вызывать его всюду, где необходимо производить центрирование. Откройте в редакторе М-файлов новый файл и наберите код программы, изображенный на рис. 2.6.



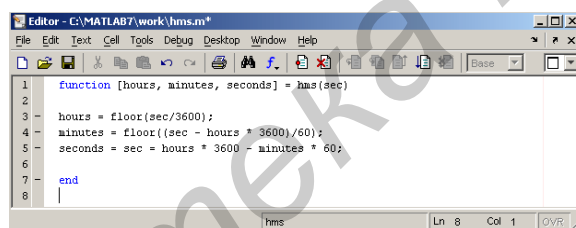
```
Editor - C:\MATLAB7\work\mydemo.m*
File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 - function Xc = centering(X)
2 - % centering: Mean-centers a matrix X
3 - % Xc is the mean-centered matrix
4
5 - [X_r, X_c] = size(X);
6 - Xc = X - ones(X_r, X_c)*mean(X);
7
8 - end
9
centering Ln 9 Col 1 OVR
```

Рис. 2.6. Файл-функция

Слово `function` в первой строке определяет, что данный файл содержит файл-функцию. Первая строка является заголовком функции, в которой

размещается имя функции и списка входных и выходных аргументов. В примере имя функции `centering`, один входной аргумент `X` и один выходной – `Xc`. После заголовка следуют комментарии, а затем – тело функции (оно в данном примере состоит из двух строк), где и вычисляется ее значение. Важно, что вычисленное значение записывается в `Xc`. Не забудьте поставить точку с запятой для предотвращения вывода лишней информации на экран. Теперь сохраните файл в рабочем каталоге. Обратите внимание, что выбор пункта **Save** или **Save as** меню **File** приводит к появлению диалогового окна сохранения файла, в поле **File name** которого уже содержится название `centering`. Не изменяйте его, сохраните файл функцию в файле с предложенным именем.

Теперь созданную функцию можно использовать так же, как и встроенные `sin`, `cos` и др. Вызов собственных функций может осуществляться из файл-программы и из другой файл-функции. Можно написать файл-функции с несколькими входными аргументами, которые размещаются в списке через запятую. Можно также создавать и функции, возвращающие несколько значений. Для этого выходные аргументы добавляются через запятую в список выходных аргументов, а сам список заключается в квадратные скобки. Хорошим примером является функция, переводящая время, заданное в секундах, в часы, минуты (рис. 2.7).



```

1 function [hours, minutes, seconds] = hms(sec)
2
3 - hours = floor(sec/3600);
4 - minutes = floor((sec - hours * 3600)/60);
5 - seconds = sec - hours * 3600 - minutes * 60;
6
7 - end
8

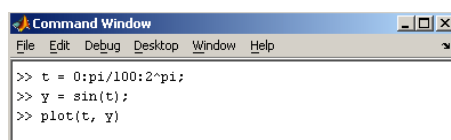
```

Рис. 2.7. Файл-функция с несколькими аргументами

При вызове файл-функций с несколькими выходными аргументами результат следует записывать в вектор соответствующей длины.

Создание графика. MatLab имеет широкие возможности для графического изображения векторов и матриц, а также для создания комментариев и печати графиков.

Функция `plot` имеет различные формы, связанные с входными параметрами, например `plot(y)` создает кусочно-линейный график зависимости элементов `y` от их индексов. Если в качестве аргументов заданы два вектора, то `plot(x,y)` создаст график зависимости `y` от `x`. Например, для построения графика функции `sin` в интервале от 0 до 2π сделаем следующее – зададим код программы, с помощью которого построится график (рис. 2.8).



```

>> t = 0:pi/100:2*pi;
>> y = sin(t);
>> plot(t, y)

```

Рис. 2.8. Командное окно с введенным в него кодом

Программа построила график зависимости, который отображается в окне **Figure 1** (рис. 2.9).

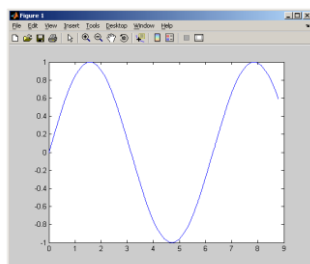


Рис. 2.9. Окно Figure 1

MatLab автоматически присваивает каждому графику свой цвет (исключая случаи, когда это делает пользователь), что позволяет различать наборы данных.

Команда `hold on` позволяет добавлять кривые на существующий график. Функция `subplot` позволяет выводить множество графиков в одном окне (рис. 2.10).

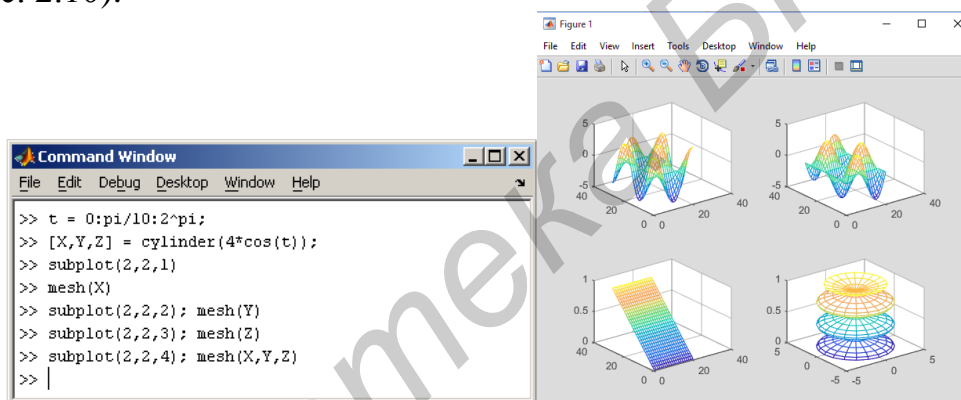


Рис. 2.10. Построение множества графиков с помощью функции `subplot`

MatLab – это очень популярный инструмент для анализа данных, его использует треть всех исследователей. MatLab – это язык высокого уровня, имеющий открытый код, что дает возможность опытным пользователям разбираться в запрограммированных алгоритмах. Простой встроенный язык программирования позволяет легко создавать собственные алгоритмы.

При создании систем передачи информации в большинстве случаев оказывается, что спектр исходного сигнала, подлежащего передаче, сосредоточен отнюдь не на тех частотах, которые эффективно пропускает имеющийся канал связи. Кроме того, во многих случаях требуется, чтобы передаваемый сигнал был *узкополосным*, т. е. эффективная ширина его спектра должна быть намного меньше центральной частоты. Перечисленные причины приводят к необходимости такой трансформации исходного сигнала, чтобы требования, предъявляемые к занимаемой сигналом полосе частот, были выполнены, а сам исходный сигнал можно было восстановить.

Решение указанной проблемы достигается путем использования *модуляции*, сущность которой заключается в следующем. Формируется некоторое колебание (чаще всего гармоническое), называемое *несущим колебанием*, или просто *несущей*, и какой-либо из параметров этого колебания изменяется во времени пропорционально исходному сигналу. Исходный сигнал называют *модулирующим*, а результирующее колебание с изменяющимися во времени параметрами – *модулированным сигналом*. Обратный процесс – выделение модулирующего сигнала из модулированного колебания – называется *демодуляцией*.

У гармонического несущего колебания $s(f) = A \cos(\omega_0 t + j_0)$ есть три параметра: амплитуда A , частота ω_0 и начальная фаза j_0 . Каждый из них можно связать с модулирующим сигналом, получив таким образом три основных вида аналоговой модуляции: *амплитудную, частотную и фазовую*. Частотная и фазовая модуляции очень тесно взаимосвязаны, поскольку обе они влияют на аргумент функции \cos . Поэтому эти два вида модуляции имеют общее название – *угловая модуляция*. Используется также *квадратурная* модуляция, при которой одновременно изменяются амплитуда и фаза сигнала.

Линейная частотная модуляция. Линейная частотная модуляция (ЛЧМ) сигнала – это специальный закон модуляции частоты радиосигнала, по которому частота несущего колебания линейно изменяется в некотором заданном диапазоне циклически.

Ее математическое описание

Во временной области. Сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) может быть описан следующим образом:

$$s_{LFM}(t) = A \cos \left(\varphi_0 + \omega_0 \left[t + \frac{at^2}{2} \right] \right),$$

где t – время; A – амплитуда; φ_0 – начальная фаза; ω_0 – начальная частота; a – скорость изменения частоты ($\frac{d\omega}{dt}$).

В частотной области. Спектр ЛЧМ описывается так:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(\omega) = \begin{cases} \frac{\pi}{4} - \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\Delta\Omega_M} T_c, & |\omega - \omega_0| \leq \frac{\Omega_M}{2}, \\ 0, & |\omega - \omega_0| > \frac{\Omega_M}{2}, \end{cases} \\ S(\omega) = \begin{cases} \frac{A_0}{2} \sqrt{\frac{T_c}{\Delta F_m}}, & |\omega - \omega_0| \leq \frac{\Omega_M}{2}, \\ 0, & |\omega - \omega_0| > \frac{\Omega_M}{2}. \end{cases} \end{array} \right.$$

Амплитудная модуляция. При амплитудной модуляции (АМ) в соответствии с модулирующим сигналом изменяется амплитуда несущего колебания:

$$S_{AM}(t) = (A_0 + ks_M(t)) \cos(\omega_0 t + j_0).$$

Постоянная составляющая A_0 добавляется к модулирующему сигналу для того, чтобы обеспечить неотрицательность амплитуды. Множитель k – коэффициент пропорциональности между модулирующим сигналом и вариациями амплитуды. Таким образом, огибающая АМ-сигнала имеет вид

$$A(t) = A_0 + ks_M(t).$$

При амплитудной модуляции спектр огибающей $\dot{S}_A(\omega)$ сдвигается в область несущей частоты $\pm\omega_0$, «раздваиваясь» и уменьшаясь в два раза по уровню:

$$\dot{S}_{AM}(\omega) = \frac{1}{2} e^{j\varphi_0} \dot{S}_A(\omega + \omega_0) + \frac{1}{2} e^{-j\varphi_0} \dot{S}_A(\omega - \omega_0).$$

По этой причине ширина спектра АМ-сигнала оказывается в два раза больше, чем у модулирующего сигнала.

В общем случае спектр АМ-сигнала содержит несущую частоту (уровень которой определяется постоянной составляющей огибающей), а также верхнюю и нижнюю боковые полосы.

Пример

Для примеров реализации АМ и ее рассматриваемых далее разновидностей будем использовать модулирующий сигнал длительностью 2 с, мгновенная частота которого линейно изменяется от нуля до 1 кГц (ЛЧМ-сигнал). Такой сигнал генерируется функцией chirp пакета Signal Processing:

```
>>Fs = 8e3; % частота дискретизации
>>T = 2; % длительность сигнала
>>t = 0:1/Fs:T; % вектор значений времени
>>f0 = 0; % начальная частота
>>f1 = 1e3; % конечная частота
>>s_M=chirp(t, f0,T, f1); % ЛЧМ-сигнал (рис. 2.11).
```

Построим график начального фрагмента этого сигнала (при попытке изобразить весь сигнал точки на графике просто сольются – в сигнале содержится слишком много колебаний). Мгновенная частота такого сигнала меняется достаточно медленно, что позволяет хорошо отслеживать эти изменения на спектрограмме (для построения спектрограммы используется функция specgram пакета Signal Processing):

```
>>plot(t(1:2000), s_M(1:2000))
>>figure
>>specgram(s_M, [], Fs) (рис. 2.12).
```

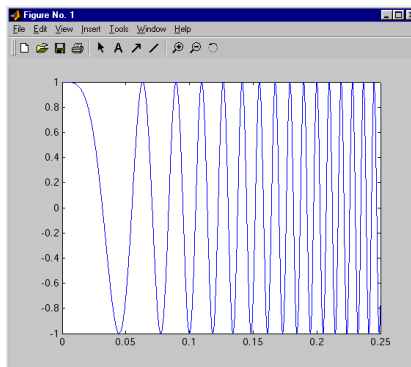


Рис. 2.11. График начального фрагмента

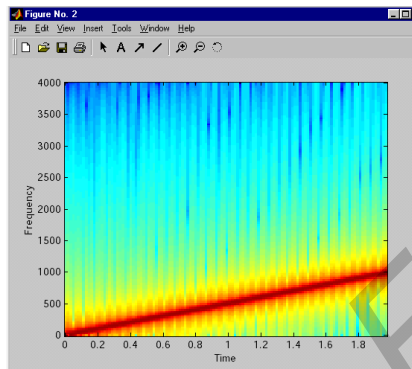


Рис. 2.12. Спектрограмма

Амплитудная модуляция осуществляется функциями `amod` (формируется вещественный выходной сигнал) и `amodsc` (формируется комплексная огибающая) пакета `Communications` при указании в них параметра типа модуляции `'amdsb-tc'`. Необязательный параметр `offset` – постоянная составляющая, добавляемая к модулирующему сигналу перед умножением его на несущее колебание. По умолчанию значение этого параметра равно $-\min(\min(x))$, т. е. выбирается минимально возможная одинаковая для всех каналов постоянная составляющая, обеспечивающая однополярность амплитудного множителя.

Реализуем амплитудную модуляцию для сформированного ранее модулирующего ЛЧМ-сигнала. Значение несущей частоты выберем равным 2 кГц. Построим график начального фрагмента полученного АМ-сигнала и спектрограмму этого сигнала:

```
>>Fc = 2e3; % несущая частота
>>s_AM = amod(s_M, Fc, Fs, 'amdsb-tc');
>>figure
>>plot(t(1:2000), s_AM(1:2000))
>>figure
>>specgram(s_AM, 256 Fs) (рис. 2.13).
```

Реализуем амплитудную модуляцию для сформированного ранее модулирующего ЛЧМ-сигнала. Значение несущей частоты выберем равным 2 кГц. Построим график начального фрагмента полученного АМ-сигнала и спектрограмму этого сигнала:

```
>>Fc = 2e3; % несущая частота
>>s_AM = amod(s_M, Fc, Fs, 'amdsb-tc');
>>figure
>>plot(t(1:2000), s_AM(1:2000))
>>figure
>>specgram(s_AM, 256, Fs) (рис. 2.14).
```

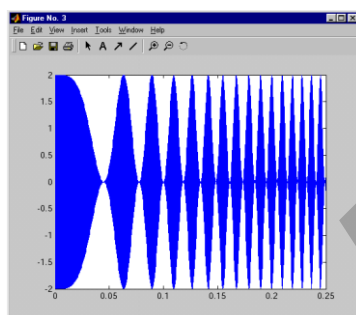


Рис. 2.13. График начального фрагмента полученного АМ-сигнала

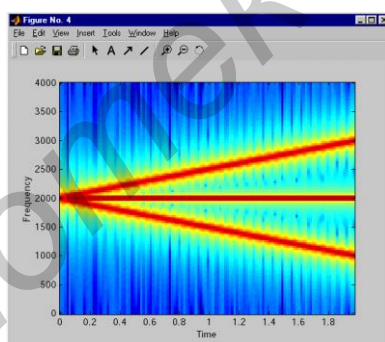


Рис. 2.14. Спектрограмма АМ-сигнала

На спектрограмме хорошо видны несущее колебание (горизонтальная линия) и две боковые полосы (наклонные линии, отслеживающие медленно меняющуюся мгновенную частоту модулирующего ЛЧМ-сигнала).

АМ с подавленной несущей. При использовании АМ с подавленной несущей к модулирующему сигналу не добавляется постоянная составляющая:

$$S_{\text{АМ-ПН}}(t) = k s_M(t) \cos(\omega_0 t + j_0).$$

Если модулирующий сигнал является знакопеременным, множитель перед функцией \cos может становиться отрицательным (это называется перемодуляцией). В моменты смены знака модулирующего сигнала фаза АМ-сигнала с подавленной несущей претерпевает скачки на 180° .

Ширина спектра АМ-сигнала с подавленной несущей, как и в случае обычной АМ, в два раза больше, чем у модулирующего сигнала.

Несущая частота будет действительно подавлена только в том случае, если модулирующий сигнал не имеет постоянной составляющей. Тогда спектр АМ-сигнала с подавленной несущей будет содержать только верхнюю и нижнюю боковые полосы.

Пример

АМ с подавленной несущей осуществляется функциями `amod` (формируется вещественный выходной сигнал) и `amodsc` (формируется комплексная огибающая) пакета Communications при указании в них параметра типа модуляции `'amdsb-sc'`. Фактически АМ с подавленной несущей соответствует обычной АМ при значении параметра `offset`, равном нулю.

Реализуем АМ с подавленной несущей для сформированного ранее модулирующего ЛЧМ-сигнала. Построим график начального фрагмента полученного сигнала и спектрограмму этого сигнала:

```
>>s_AM_SC = amod(s_M, Fc, Fs, 'amdsb-sc');
```

```
>>figure
```

```
>>plot(t(1:2000), s_AM_SC(1:2000)) (рис. 2.15).
```

```
>>figure
```

```
>>specgram(s_AM_SC, 256, Fs) (рис. 2.16).
```

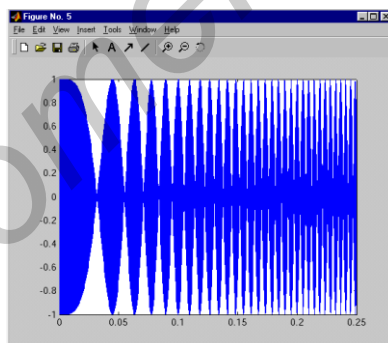


Рис. 2.15. График начального фрагмента полученного сигнала

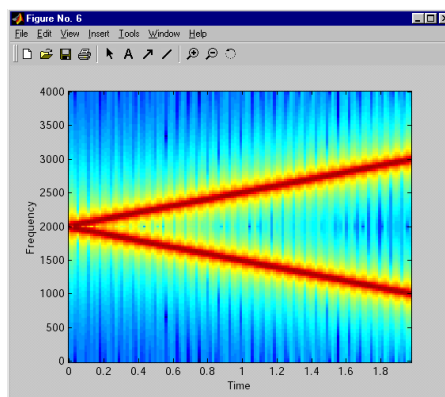


Рис. 2.16. Спектрограмма АМ-сигнала с подавленной несущей

При сравнении спектрограмм обычной АМ и АМ с подавленной несущей хорошо видно, что различие состоит только в отсутствии несущего колебания во втором случае.

Однополосная модуляция. Рассмотренная в предыдущем разделе двухполосная АМ с подавленной несущей имеет преимущества перед обычной АМ только в энергетическом плане – за счет устранения несущего колебания. Ширина спектра при этом по-прежнему вдвое больше, чем у модулирующего сигнала. Однако спектры двух боковых полос АМ-сигнала являются зеркальным отражением друг друга, т. е. они несут одну и ту же информацию. Поэтому одну из боковых полос можно удалить. Получающаяся модуляция называется однополосной (английский термин – Single Side Band, SSB).

В зависимости от того, какая боковая полоса сохраняется, говорят об однополосной модуляции с использованием верхней или нижней боковой полосы. Формирование однополосного сигнала проще всего пояснить, приведя несколько спектральных графиков (рис. 2.17).

По сути дела при однополосной модуляции происходит просто сдвиг спектра сигнала в окрестности частоты несущего колебания. В отличие от АМ каждая «половинка» спектра смещается в своем направлении: область положительных частот – к $+w_0$, а область отрицательных частот – к $-w_0$. При формировании сигнала с нижней боковой полосой спектр модулирующего сигнала инвертируется (зеркально переворачивается вдоль оси частот).

Очевидно, что ширина спектра однополосного сигнала равна ширине спектра модулирующего сигнала. Таким образом, спектр однополосного сигнала оказывается в два раза уже, чем при обычной АМ.

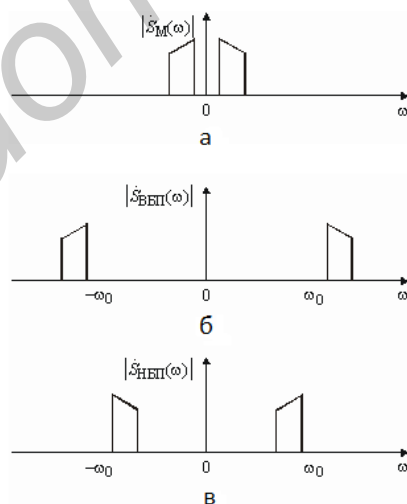


Рис. 2.17. Однополосная модуляция:

а – спектр модулирующего сигнала; б – спектр однополосного сигнала с верхней боковой полосой; в – то же с нижней боковой полосой

В отличие от предыдущих случаев здесь нельзя простыми средствами выразить связь между модулированным и модулирующим сигналами. Чтобы сделать это, придется воспользоваться преобразованием Гильберта и понятием аналитического сигнала.

Итак, прежде всего мы формируем из модулирующего сигнала аналитический сигнал, имеющий односторонний спектр. Умножение этого сигнала на $\exp(-j\omega_0 t)$ сдвигает его односторонний спектр на ω_0 вправо (вверх по частоте), формируя односторонний спектр однополосного сигнала с верхней боковой полосой. Наконец, чтобы перейти от аналитического сигнала обратно к вещественному, нужно взять вещественную часть. Формирование сигнала с нижней боковой полосой описывается аналогично, только умножать аналитический сигнал нужно на $\exp(j\omega_0 t)$ (тогда его спектр сдвинется влево, в область отрицательных частот, и займет положение нижней боковой полосы). Запишем все сказанное математически:

$$S_{SSB}(t) = \text{Re}((x(t) + jx^{\wedge}(t))\exp(mj\omega_0 t)) = x(t) \cos \omega_0 t \pm x^{\wedge}(t) \sin \omega_0 t.$$

Знак «плюс» в окончательной формуле соответствует выделению верхней боковой полосы, «минус» – нижней.

Итак, однополосный сигнал можно представить как сумму двух АМ-сигналов, несущие колебания которых имеют одну и ту же частоту, но сдвинуты по фазе друг относительно друга на 90° . Амплитудными функциями этих АМ-сигналов являются модулирующий сигнал и его квадратурное дополнение. В зависимости от того, складываются эти два АМ-сигнала или вычитаются (а точнее, какая из двух несущих опережает другую по фазе), формируется однополосный сигнал с верхней или нижней боковой полосой.

Пример

Реализуем однополосную модуляцию для сформированного ранее модулирующего ЛЧМ-сигнала. Создадим однополосные сигналы с нижней и верхней боковой полосой и построим их спектрограммы:

```
>> s_SSB_LOW = amod(s_M, Fc, Fs, 'amssb');
```

```
>> s_SSB_HI = amod(s_M, -Fc, Fs, 'amssb');
```

```
>> figure
```

```
>> specgram(s_SSB_LOW, [], Fs) (рис. 2.18).
```

```
>> figure
```

```
>> specgram(s_SSB_HI, [], Fs) (рис. 2.19).
```

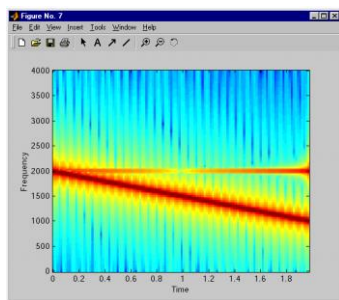


Рис. 2.18. Спектрограмма однополосного сигнала с нижней боковой полосой

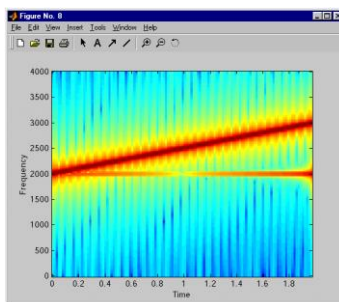


Рис. 2.19. Спектрограмма однополосного сигнала с верхней боковой полосой

На спектрограммах однополосного сигнала хорошо видно отсутствие одной из боковых полос; правда, наблюдаются и неподавленные остатки несущего колебания.

Угловая модуляция. Фазовая и частотная модуляции тесно взаимосвязаны и вместе называются угловой модуляцией. Сигнал с угловой модуляцией имеет вид колебания, начальная фаза которого зависит от времени:

$$S_{\text{УМ}}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + j(t)).$$

Различие между фазовой и частотной модуляциями заключается лишь в том, как именно начальная фаза $j(t)$ связана с модулирующим сигналом.

При фазовой модуляции (ФМ) начальная фаза колебания прямо пропорциональна модулирующему сигналу:

$$j(t) = k s_M(t).$$

Сам сигнал с фазовой модуляцией, таким образом, имеет вид

$$S_{\text{ФМ}}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + k s_M(t)).$$

Для сигналов с угловой модуляцией вводится понятие мгновенной частоты, определяемой как производная от полной фазы (т. е. всего аргумента косинуса):

$$\omega(t) = \frac{d}{dt}(\omega_0 t + \varphi(t)) = \omega_0 \frac{d\varphi(t)}{dt}.$$

При частотной модуляции (ЧМ) мгновенная частота связана с модулирующим сигналом линейным соотношением

$$\omega(t) = \omega_0 + k s_M(t).$$

Сам сигнал с частотной модуляцией записывается так:

$$S_{\text{ЧМ}}(t) = A_0 \cos \left(\omega_0 t + k \int_{-\infty}^t s_M(t') dt' \right).$$

Итак, в случае сигнала с угловой модуляцией любого типа от времени зависят и начальная фаза, и мгновенная частота, а полная фаза является нелинейной функцией времени. Формулы, показывающие зависимость этих параметров от времени для фазовой и частотной модуляций, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Зависимость параметров от времени для фазовой и частотной модуляций

Параметр	ФМ	ЧМ
Начальная фаза	$j(t) = k s_M(t)$	$\varphi(t) = k \int_{-\infty}^t s_M(t') dt'$
Полная фаза	$Y(t) = \omega_0 t + k s_M(t)$	$\psi(t) = \omega_0 t + k \int_{-\infty}^t s_M(t') dt'$
Мгновенная частота	$\omega(t) = \omega_0 + k \frac{ds_M(t)}{dt}$	$\omega(t) = \omega_0 + k s_M(t)$

При произвольном модулирующем сигнале спектр сигнала с угловой модуляцией не удастся рассчитать аналитически. Проанализируем спектр сигнала с угловой модуляцией для случая гармонического модулирующего сигнала:

$$S(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + b \sin(Wt)).$$

Параметр b называется *индексом* угловой модуляции. Мгновенная частота такого сигнала меняется по закону

$$\omega(t) = \omega_0 + bW \cos(Wt).$$

Максимальное отклонение мгновенной частоты от значения ω_0 называется *девиацией частоты* и обозначается $D\omega$:

$$D\omega = b\omega, \quad \beta = \frac{\Delta\omega}{\Omega}.$$

Сигнал с гармонической угловой модуляцией можно представить в виде ряда

$$s(t) = A_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k(\beta) \cos((\omega_0 + k\Omega)t).$$

Здесь $J_k(b)$ – функция Бесселя порядка k от аргумента b . Таким образом, спектр сигнала с угловой модуляцией содержит бесконечное количество составляющих. Однако при фиксированной величине аргумента значения функций Бесселя с ростом порядка убывают по абсолютной величине. Если $b \gg 1$ (при этом $D\omega \gg W$ и угловую модуляцию называют *широкополосной*), то можно пренебречь составляющими с номерами $|k| > b$. Эффективная ширина спектра сигнала с широкополосной угловой модуляцией, таким образом, равна $2b W = D\omega$, т. е. равна удвоенной девиации частоты.

Если $b \ll 1$ (при этом $D\omega \ll W$ и угловую модуляцию называют узкополосной), то можно приближенно считать, что в спектре сигнала с угловой модуляцией присутствуют только компоненты с $k = -1, 0$ и 1 . Эффективная ширина спектра сигнала с узкополосной угловой модуляцией, таким образом, равна $2W$, т. е. удвоенной частоте модулирующего сигнала.

Пример

Угловая модуляция осуществляется функциями `amod` (формируется вещественный выходной сигнал) и `amodse` (формируется комплексная огибающая) пакета Communications при указании в них параметра типа модуляции 'pm' (фазовая модуляция) или 'fm' (частотная модуляция). Сигнал с ФМ формируется согласно приведенной выше формуле, для формирования сигнала с ЧМ вектор модулирующего сигнала приближенно интегрируется с помощью функции `sumsum` (фактически это соответствует численному интегрированию методом прямоугольников). Необязательный параметр `deviation` соответствует коэффициенту k в приведенных выше формулах – на него умножается модулирующий сигнал перед выполнением собственно модуляции.

В качестве примера сформируем два сигнала с гармонической угловой модуляцией при разных индексах модуляции и построим графики сигналов и их спектров.

```
>> Fs = 8e3; % частота дискретизации
>> T = 2; % длительность сигнала
>> t = 0:1/Fs:T; % вектор значений времени
>> F = 100; % частота модулирующего сигнала
```

```

>> s_M = cos(2*pi*F*t); % гармонический модулирующий сигнал
>> Fc = 2e3; % несущая частота
>> s_PM_1 = amod(s_M, Fc, Fs, 'pm1', 0.1); % узкополосный сигнал
>> s_PM_2 = amod(s_M, Fc, Fs, 'pm1', 10); % широкополосный сигнал
>> figure
>> subplot(1, 2, 1)
>> plot(t(1:200), s_PM_1(1:200))
>> ylim([-1.1 1.1])
>> title('\beta=0.1')
>> subplot(1, 2, 2)
>> plot(t(1:200), s_PM_2(1:200))
>> ylim([-1.1 1.1])
>> title('\beta=10')

```

Как видите, на графике узкополосного УМ-сигнала ($\beta = 0.1$, рис. 2.20) отклонения начальной фазы визуально не заметны, а на графике широкополосного сигнала ($\beta = 10$, рис. 2.21) они хорошо видны. Неравномерность амплитуды возникает из-за дискретного характера расчета – дискретные значения времени попадают не во все максимумы сигнала.

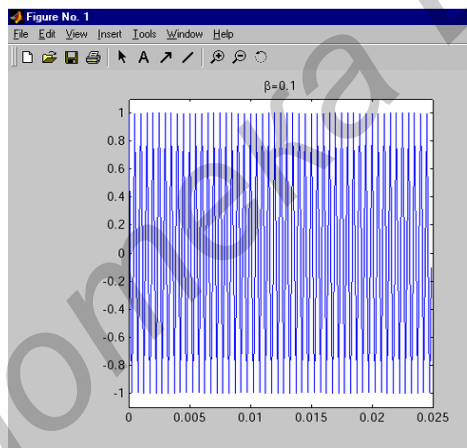


Рис. 2.20. График сигналов

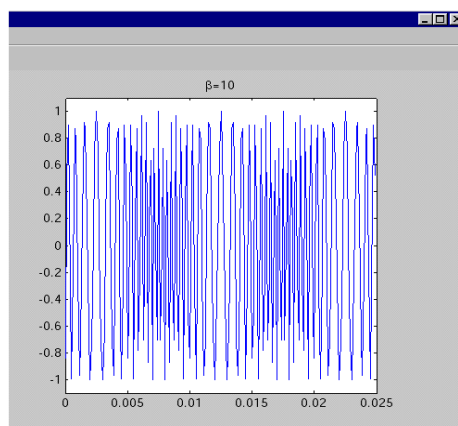


Рис. 2.21. График спектров

Теперь строим графики спектров:

```
>> N = floor(length(t)/2);  
>> f = (0:N)/length(t) * Fs; % вектор значений частот для графиков  
>> spec_PM_1 = fft(s_PM_1); % расчет спектров  
>> spec_PM_2 = fft(s_PM_2);  
>> figure  
>> subplot(1, 2, 1)  
>> plot(f, abs(spec_PM_1(1:N+1)))  
>> title('\beta=0.1')  
>> subplot(1, 2, 2)  
>> plot(f, abs(spec_PM_2(1:N+1)))  
>> title('\beta=10')
```

Графики показывают, что спектр узкополосного сигнала (рис. 2.22) действительно можно считать содержащим лишь три составляющие. В широкополосном (рис. 2.23) – ширина спектра примерно равна удвоенной девиации частоты, т. е. $2\beta F = 2 \cdot 10 \cdot 100 \text{ Гц} = 2 \text{ кГц}$.

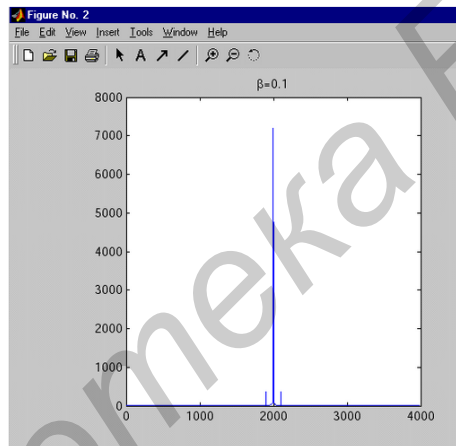


Рис. 2.22. График узкополосного УМ-сигнала ($\beta = 0,1$)

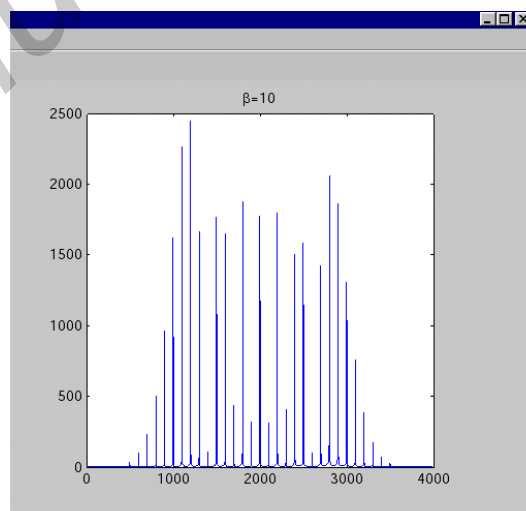


Рис. 2.23. График широкополосного сигнала ($\beta = 10$)

Задание 1

Реализовать АМ и ее разновидности, используя модулирующий сигнал длительностью 2 с, мгновенная частота которого линейно изменяется от нуля до 1 кГц (ЛЧМ-сигнал). Такой сигнал генерируется функцией `chirp` пакета `SignalProcessing` (код скопировать в `MatLab`):

```
>> Fs = 8e3; % частота дискретизации
>> T = 2; % длительность сигнала
>> t = 0:1/Fs:T; % вектор значений времени
>> f0 = 0; % начальная частота
>> f1 = 1e3; % конечная частота
>> s_M=chirp(t, f0, T, f1); % ЛЧМ-сигнал
```

Построим график начального фрагмента этого сигнала (при попытке изобразить весь сигнал точки на графике просто сольются – в сигнале содержится слишком много колебаний). Мгновенная частота такого сигнала меняется достаточно медленно, что позволяет хорошо отслеживать эти изменения на спектрограмме (для построения спектрограммы используется функция `specgram` пакета `SignalProcessing`) (добавить в уже скопированный код):

```
>> plot(t(1:2000), s_M(1:2000))
>> figure
>> specgram(s_M, [], Fs)
```

Амплитудная модуляция осуществляется функцией `ammod` пакета `Communications`. Необязательные параметры `ini_phase` и `carraMp` задают соответственно начальную фазу несущего колебания и амплитуду несущего колебания (т. е. постоянную составляющую, добавляемую к модулирующему сигналу перед умножением его на несущее колебание). По умолчанию значение параметра `carraMp`, в отличие от того, что было в устаревших функциях `amod` и `amodsc`, равно нулю, поэтому амплитуду несущего колебания всегда необходимо задавать принудительно.

Реализуем амплитудную модуляцию для сформированного ранее модулирующего ЛЧМ-сигнала. Значение несущей частоты выберем равным 2 кГц и используем минимально возможное значение амплитуды несущего колебания, рассчитав его как `max(abs(s_M))`. Построим график начального фрагмента полученного АМ-сигнала и спектрограмму этого сигнала (добавить к уже имеющейся записи в `MatLab`):

```
>> Fc = 2e3; % несущая частота
>>% s_AM = ammod(s_M, Fc, Fs, [], max(abs(s_M))); % новая
версия
>>s_AM = amod(s_M, Fc, Fs, 'amdsb-tc'); % старая версия>>
figure
>> plot(t(1:2000), s_AM(1:2000))
>> figure
>> specgram(s_AM, 256, Fs)
```


Задание 2

Реализовать АМ с подавленной несущей. Такой сигнал осуществляется функцией `ammod` пакета `Communications` по умолчанию, т. е. при отсутствии входного параметра `carriamp` (его значение по умолчанию равно нулю).

Реализуем АМ с подавленной несущей для сформированного ранее модулирующего ЛЧМ-сигнала. Построим график начального фрагмента полученного сигнала и спектрограмму этого сигнала (предыдущий код для АМ необходимо стереть):

```
>>% s_AM_SC = ammod(s_M, Fc, Fs); % новая версия
>>s_AM_SC = amod(s_M, Fc, Fs, 'amdsb-sc'); % старая версия
>> figure
>> plot(t(1:2000), s_AM_SC(1:2000)) >> figure
>> specgram(s_AM_SC, 256, Fs)
```

Однополосная модуляция. АМ с подавленной несущей осуществляется функцией `ssbmod` пакета `Communications`. При этом используется формирование сигнала с помощью преобразования Гильберта, выполняемого в частотной области с использованием функции `hilbert` пакета `SignalProcessing`.

По умолчанию функция `ssbmod` формирует сигнал с нижней боковой полосой. Для формирования сигнала с верхней боковой полосой необходимо указать дополнительный параметр – строку `'upper'`. Перед этим параметром следует еще один необязательный параметр – начальная фаза несущего колебания `ini_phase`. Поэтому значение этой фазы при формировании сигнала с верхней боковой полосой необходимо обязательно задать хотя бы в виде пустой матрицы (для использования значения по умолчанию, равного нулю).

Реализуем однополосную модуляцию для сформированного ранее модулирующего ЛЧМ-сигнала. Создадим однополосные сигналы с нижней и верхней боковой полосой и построим их спектрограммы (дописать к уже вставленной записи для АМ с подавленной несущей):

```
>>% s_SSB_LOW = ssbmod(s_M, Fc, Fs); % новая версия >>%
s_SSB_HI = ssbmod(s_M, Fc, Fs, [], 'upper'); % новая версия
>>s_SSB_LOW = amod(s_M, Fc, Fs, 'amssb'); % старая версия
>> s_SSB_HI = amod(s_M, -Fc, Fs, 'amssb'); % старая версия>>
figure
>> specgram(s_SSB_LOW, [], Fs) >> figure
>> specgram(s_SSB_HI, [], Fs)
```

2.3. Приборы и оборудование

Персональный компьютер. Средство программной разработки, моделирования и отладки `MatLab`.

2.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы измерительных установок.
3. Математическая обработка результатов эксперимента
4. Графическое представление результатов наблюдений.
5. Анализ полученных результатов.

2.5. Контрольные вопросы

1. Структура окна редактора MatLab.
2. Правила ввода команд.
3. Правила ввода функций и операндов.
4. Правила ввода комментариев.
5. Правила просмотра результатов операций.
6. Правила создания двумерных графиков.
7. Запуск и отладка программ.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ СИГНАЛОВ В СРЕДЕ MULTISIM

3.1. Цель работы

Освоение основных практических навыков работы с моделями источников импульсных, гармонических и модулируемых колебаний.

3.2. Методические указания по выполнению лабораторной работы

Теоретические сведения

Комплекс Multisim представляет собой средство программной разработки, моделирования и отладки электрических цепей.

Для его работы требуются персональный компьютер, процессор которого имеет тактовую частоту не ниже 233 МГц, и операционная система WindowsXP или Windows 7.

Интерфейс программного комплекса Multisim

Интерфейс пользователя состоит из полосы меню, панели инструментов и рабочей области (рис. 3.1).

Для правильной работы документа необходимо, чтобы на компьютере была установлена программа Multisim 11.0 и файлы с расширением NICircuitDesignSuitev. 11.0.

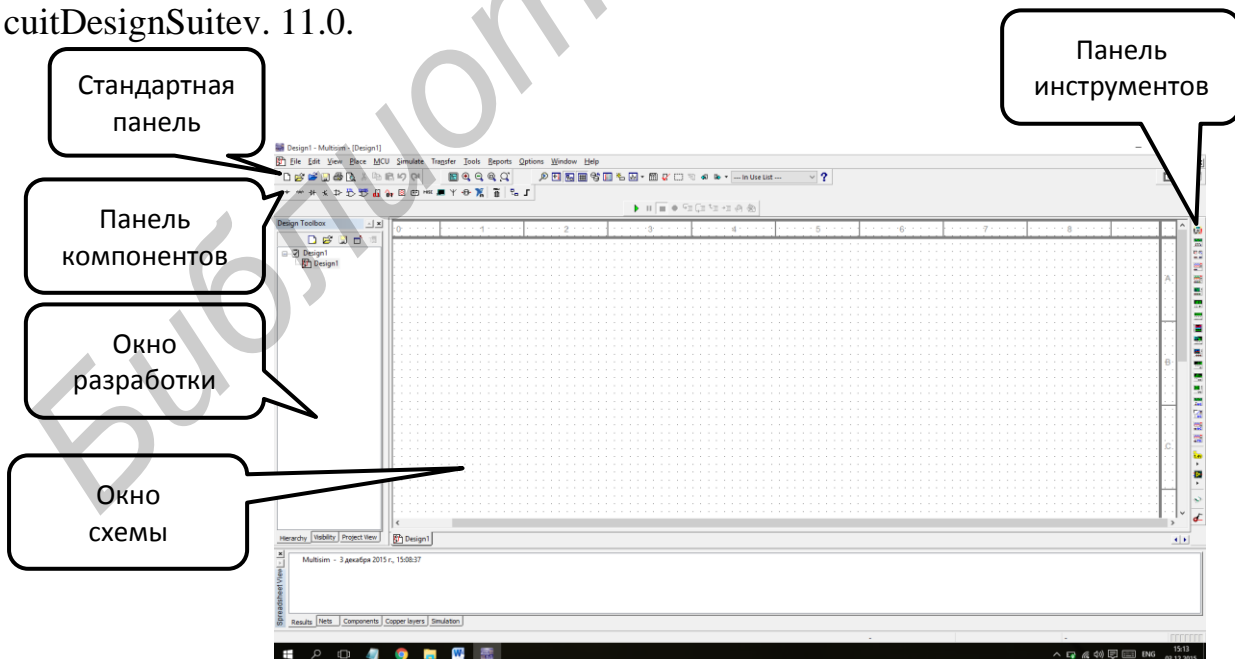


Рис. 3.1. Общий вид интерфейса среды Multisim

Для создания в рабочей области некоторой электронной схемы и последующего анализа используются следующие кнопки, представленные на рис. 3.2 (по порядку):

1. Источники питания.
2. Базисные элементы.
3. Диоды.
4. Транзисторы.
5. Аналоговые компоненты.
6. Логические микросхемы ТП.
7. Логические микросхемы CMOS.
8. Цифровые микросхемы.
9. Аналого-цифровые компоненты.
10. Индикаторы.
11. Компоненты питания.
12. Прочие компоненты.
13. Периферийные устройства.
14. ВЧ-компоненты.
15. Электромеханические компоненты инструментов, которые используются при разработке схем и их анализе (рис. 3.3).



Рис. 3.2. Основные кнопки для создания схем

В правой части схемы находится набор измерительных инструментов, которые используются при разработке схем и их анализе (см. рис. 3.3)



Рис. 3.3. Набор измерительных инструментов

Окно разработки (DesignToolbox). В окне разработки находятся средства управления различными элементами схемы. Закладка «Доступность» (Visibility) позволяет скрыть или отобразить слои схемы рабочей области. Закладка «Иерархия» (Hierarchy) отображает взаимосвязь между файлами открытого проекта в виде древовидной структуры. Закладка «Проект» (Project) содержит информацию об открытом проекте. Пользователь может добавить файлы в папки открытого проекта, изменить доступ к файлам и создать архив папки.

Глобальные настройки. Глобальные настройки управляют свойствами среды Multisim. Доступ к ним открывается из диалогового окна «Свойства» (Preferences). Выберите пункт «Опции/глобальные настройки» (Options/GlobalPreferences), откроется окно «Свойства» со следующими закладками.

Paths (Путь) – здесь можно указать путь к файлам баз данных и другие настройки.

Save (Сохранить) – здесь можно настроить период автоматического сохранения.

Parts (Компоненты) – здесь можно выбрать режим размещения компонентов и стандарт символов (ANSI или DIN). Также здесь находятся настройки эмуляции по умолчанию.

General (Общие) – здесь можно изменить поведение прямоугольника выбора, колеса мыши, инструментов соединения и автоматического соединения.

Настройки листа. Диалоговое окно настройки свойства листа (SheetProperties) используется для изменения свойств каждого листа. Эти свойства сохраняются с файлом схемы.

Настройки листа сгруппированы в следующие закладки.

Circuit (Схема) – для выбора цветовой схемы и внешнего вида текста рабочей области.

Workspace (Рабочая область) – для настройки размера листа и его свойств.

Wring (Соединение) – здесь находятся настройки соединений и шины.

ВНИМАНИЕ! При создании и изучении различных электрических схем все узлы соединения должны быть пронумерованы. Это возможно сделать, если выбрать опцию «Установки/Схемные установки» и в поле «Номера цепей» нажать кнопку «Отображать». Затем нажать «ОК» (рис. 3.4, 3.5).

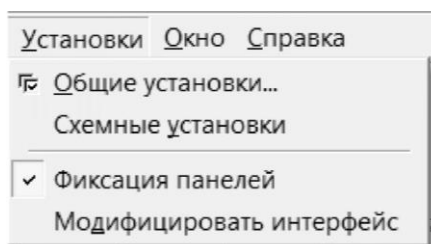


Рис. 3.4. Схемные установки

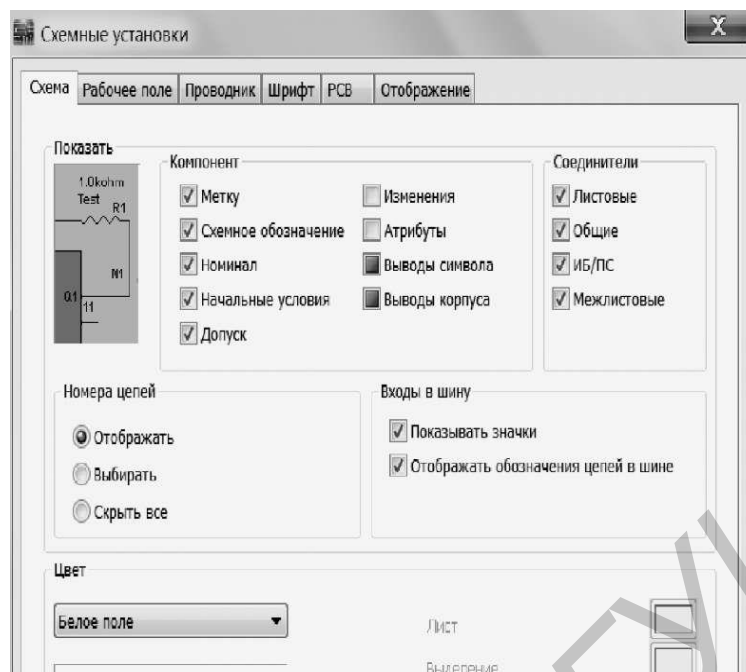


Рис. 3.5. Установка номеров соединений

Проводник компонентов. Проводник компонентов (Component browser) – это место, где вы собираете компоненты, чтобы разместить их на схеме.

После выбора компонентов из базы данных они размещаются на схеме и соединяются между собой. Двойной щелчок по компоненту в проводнике прикрепит его к курсору. После этого можно поместить элемент на схему, просто нажав правую кнопку мыши.

В это время и после установки компоненты можно повернуть. Чтобы это сделать в первом случае, нажмите **Ctrl-R**. Чтобы повернуть установленный компонент, выделите его и тоже нажмите **Ctrl-R** или выберите в контекстном меню пункт «повернуть на 90° по или против часовой стрелки». Чтобы выбрать элемент, просто щелкните по нему мышью. Для выбора нескольких компонентов нажмите кнопку мыши и, удерживая ее, перемещайте мышь, рисуя прямоугольник вокруг нужных компонентов. Выбранные элементы обозначаются пунктирной линией. Клавиша **Shift** позволяет добавлять или снимать выделение с нескольких компонентов.

Необходимо отметить, что изменить параметры компонентов схемы возможно и путем двойного щелчка левой кнопки мыши по выбранному элементу схемы. При этом открываются закладки, в которых необходимо внести соответствующие изменения.

Чтобы начать вести соединяющий провод, щелкните по разъему. Чтобы завершить соединение, щелкните по конечному терминалу.

Работа с приборами

Мультиметр. Мультиметр предназначен для измерения переменного или постоянного тока или напряжения, сопротивления или затухания между двумя узлами схемы. Диапазон измерения мультиметра подбирается автоматически (рис. 3.6, 3.7). Его внутреннее сопротивление и ток близки к идеальным значениям, но их можно изменить.

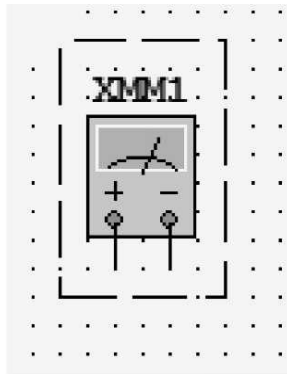


Рис. 3.6. Символ мультиметра

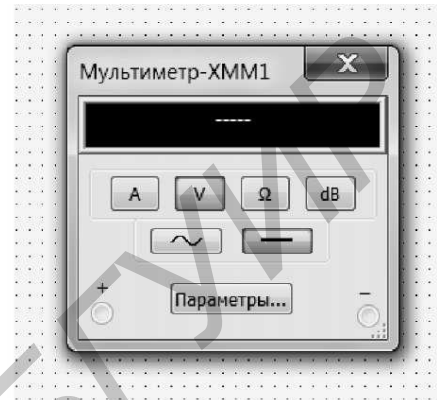


Рис. 3.7. Лицевая панель мультиметра

Генератор сигналов. Генератор сигналов (function generator) – это источник напряжения, который может генерировать синусоидальные, пилообразные прямоугольные импульсы (рис. 3.8, 3.9). Можно изменить форму сигнала, его частоту, амплитуду, коэффициент заполнения и постоянный сдвиг. Диапазон генератора достаточен, чтобы воспроизвести сигналы с частотами от нескольких герц до мегагерц.

У генератора сигналов есть три источника сигналов. Общий центральный вывод определяет положение нуля.

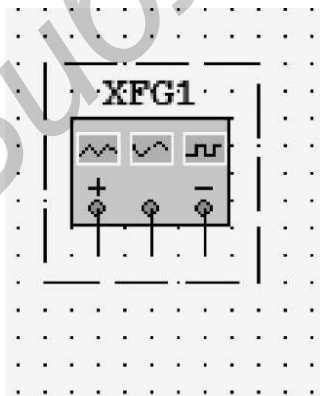


Рис. 3.8. Символ генератора сигналов

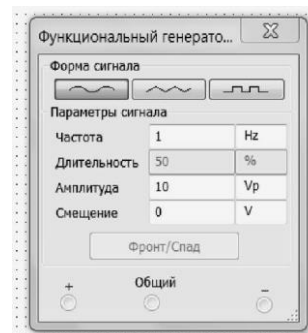


Рис. 3.9. Лицевая панель генератора

Осциллографы. В Multisim есть несколько модификаций осциллографов, которыми можно управлять как настоящими. Они позволяют устанавливать параметры развертки и напряжения, выбирать тип и уровень запуска измерений. Мы будем использовать на лабораторных занятиях 2-канальный осциллограф (рис. 3.10, 3.11).

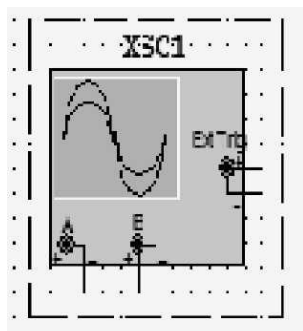


Рис. 3.10. Символ осциллографа

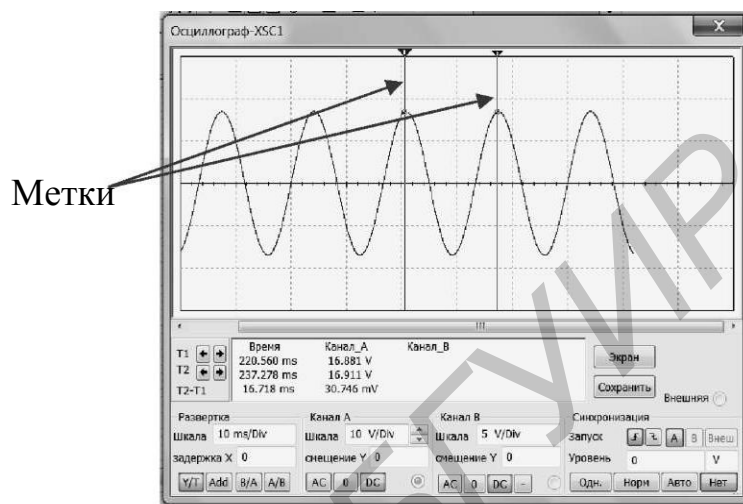


Рис. 3.11. Лицевая панель осциллографа

Из рис. 3.11 видно, что с помощью меток возможно измерять амплитудные значения и временные интервалы.

Плоттер Боде. Плоттер Боде отображает относительный амплитудный и фазовый отклик выходного и входного сигналов (рис. 3.12, 3.13). Это особенно удобно при анализе свойств полосовых фильтров

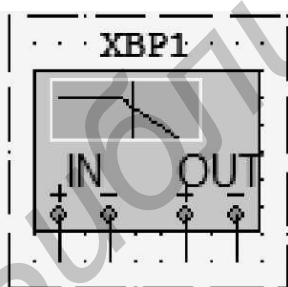


Рис. 3.12. Символ плоттера Боде

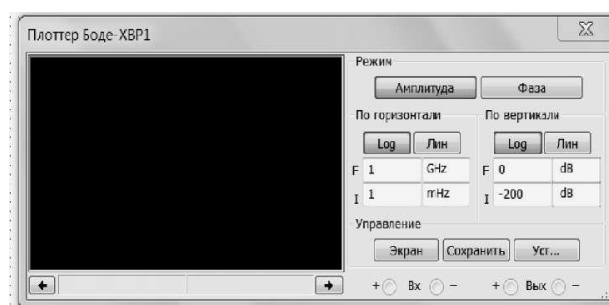


Рис. 3.13. Лицевая панель плоттера Боде

Анализатор спектра. Спектральный анализатор (Spectrum analyzer) для измерения спектра амплитуд гармоник с заданной частотой (рис. 3.14, 3.15).

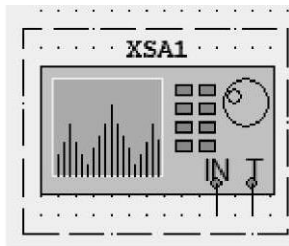


Рис. 3.14. Символ анализатора спектра

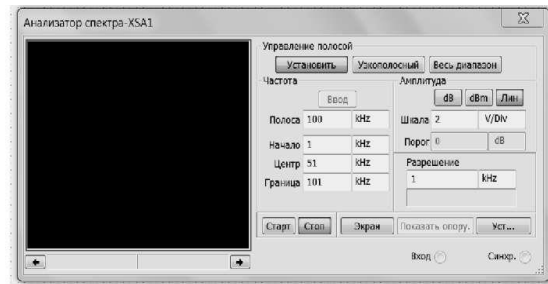


Рис. 3.15. Лицевая панель анализатора спектра

Задание 1

Изучить основные принципы работы с пакетом Multisim.

Изучить назначение основных элементов наборов Sources, Basic и Instruments.

Для этого необходимо выбрать группу (POWER SOURCES) и найти символ источника чисто гармонических колебаний. Здесь же находится символ элемента «Заземление» – (GROUND) (рис. 3.16).

В группе (SIGNAL VOLTAGE SOURCES) находятся различные источники модулированных колебаний.

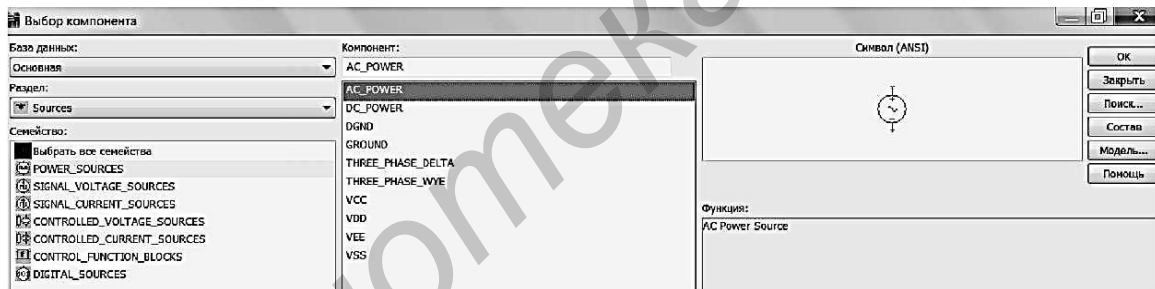


Рис. 3.16. Группа источников сигналов

Необходимо выбрать генераторы с АМ (AM VOLTAGE), ЧМ (FM VOLTAGE) и импульсной последовательности (PULSE VOLTAGE).

ВНИМАНИЕ! При задании нецелых параметров *вместо запятой ставится точка*. Например, коэффициент модуляции $M = 0.5$.

Задание 2

Изучить методику создания электронных схем.

Запустите Multisim. Автоматически будет создан новый файл, который необходимо сохранить по команде «File/Save as». Файл назвать по фамилии исполнителя.

Создайте в рабочей области резистивный делитель с коэффициентом передачи $K_d = 1/2$. Для этого из набора компонентов перенесите резисторы и

источник гармонических колебаний на рабочий стол с помощью мыши, не отпуская левую кнопку. Соедините выводы резисторов и генератора для получения заданной схемы. Для этого щелкните по одному из выводов левой кнопкой мыши и, не отпуская кнопку, доведите указатель до вывода другого элемента. Обозначьте эти резисторы и установите необходимые значения, для чего дважды щелкните мышью по нужному элементу. Появится соответствующая закладка (рис. 3.17).

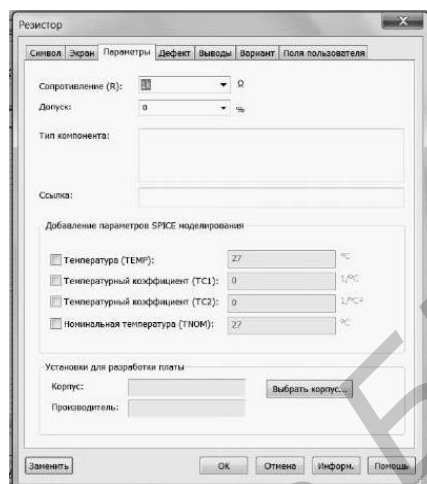


Рис. 3.17. Изменение параметров резистора

Подобным образом установите параметры источника колебаний (см. рис. 3.9). Затем проставьте номера узлов. К узлам 1 и 2 подключите входы виртуального осциллографа.

Для наглядности обозначьте провода к осциллографу разными цветами. Для этого надо щелкнуть левой кнопкой мыши, затем выбрать в появившемся окне WireProperties/SetNodeColor. Дважды щелкните по значку осциллографа. Появится панель осциллографа. Включите схему (щелчок по «1» выключателя «0-1»). Изменяя параметры развертки, добейтесь устойчивого изображения. Щелкните мышью по кнопке «Pause».

Задание 3

Подключите источник АМ-колебаний, установите требуемые параметры (рис. 3.18) и просмотрите форму колебаний.

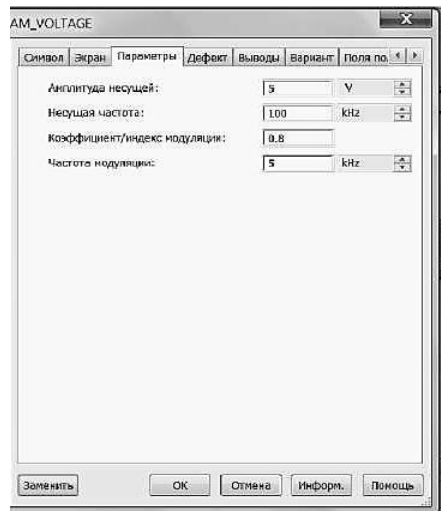


Рис. 3.18. Панель установки параметров генератора АМ-колебаний

Задание 4

Подключите источник ЧМ-колебаний. Установите требуемые параметры и просмотрите форму колебаний.

Задание 5

Подключите источник импульсных колебаний. Установите требуемые параметры и просмотрите форму колебаний (рис. 3.19).

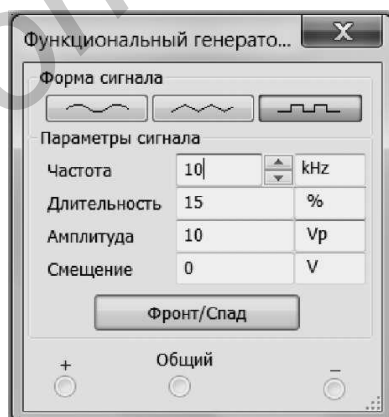


Рис. 3.19. Установка параметров генератора прямоугольной последовательности видеоимпульсов

ВНИМАНИЕ! Чтобы подключать различные источники сигналов, необходимо:

- щелчком правой кнопки мыши выделить источник сигнала и затем нажать «Delete»;
- щелчком левой кнопки мыши выделить провод и нажать «Delete»;
- в образовавшийся разрыв подключить новый источник.

В виртуальном двухлучевом осциллографе, как и в реальном, в каждом канале имеется «закрытый» вход (*AC*) для сигналов без постоянной составляющей, и «открытый» – (*DC*) для сигналов с постоянной составляющей. С целью получить удобные для наблюдения осциллограммы исследуемых колебаний необходимо подбирать длительность развертки осциллографа и значения координаты «у» масштабной сетки.

Задание 6

Произвести спектральный анализ сигналов.

Выберите в меню «Simulate/Analysis» команду «Fourier». Заполните необходимые позиции закладки (рис. 3.20). Затем на этой закладке выберите опцию «Переменные», откроется окно (рис. 3.21).

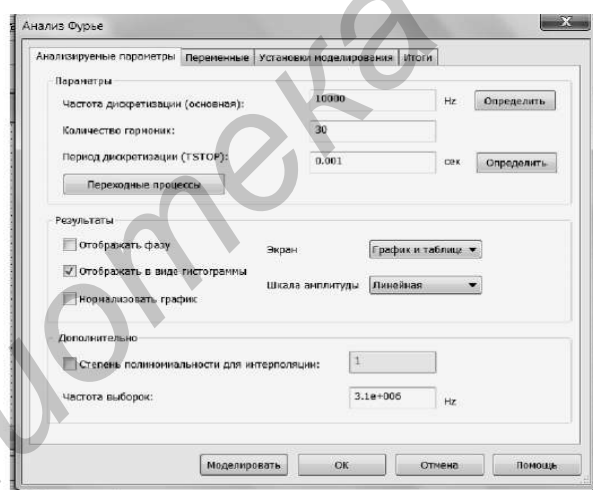


Рис. 3.20. Установка данных анализа Фурье

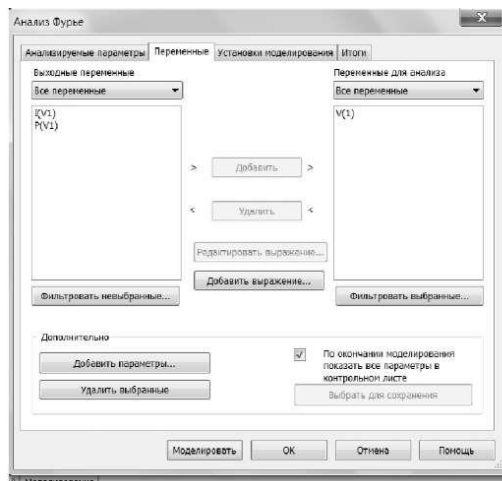


Рис. 3.21. Выбор точки анализа

В левой колонке найдите символ, где собираетесь проводить анализ. Выделите его и нажмите кнопку «Добавить». Выделенный символ переместится вправо. Нажмите кнопку «Simulate» (Моделирование). Появится окно результатов, показанное на рис. 3.22. Для анализа полученных результатов желательно воспользоваться маркерами, для чего щелкнуть по значку «Показать (скрыть) маркеры». При совпадении метки маркера с частотой гармоники изменяется цвет маркера, а в дополнительном окне отображаются абсолютные и относительные значения выбранных точек по координатам «y» и «x» (рис. 3.23).

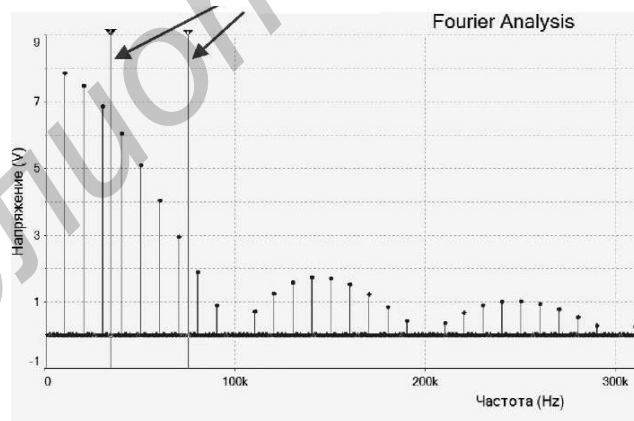


Рис. 3.22. Амплитудный спектр сигнала

Курсор	
v (1)	
x1	20.3252k
y1	3.7293
x2	40.6504k
y2	0.0000
dx	20.3252k
dy	-3.7293
dy/dx	-183.4830μ
1/dx	49.2000μ

Рис. 3.23. Показания курсоров

Задание 7

Определить спектральные характеристики сигналов исследуемых ранее генераторов.

ВНИМАНИЕ! Этот анализ необходимо проводить при выполнении соответствующих пунктов заданий 2–5.

3.3. Приборы и оборудование

Персональный компьютер. Средство программной разработки, моделирования и отладки электрических цепей Multisim.

3.4. Содержание отчета

1. Схема исследуемого устройства.
2. Осциллограммы исследуемых сигналов.
3. Амплитудные и фазовые спектры сигналов.
4. Выводы по результатам проделанной работы.

3.5. Контрольные вопросы

1. Перечислите основные свойства программы Multisim.
2. Как задаются параметры основных элементов цепей?
3. Как задаются параметры радиосигналов с АМ и ЧМ?
4. Как смоделировать импульсный радиосигнал с АМ?
5. Как получить числовые значения спектральных характеристик?
6. Как измерить параметры сигналов по осциллограмме виртуального осциллографа?
7. Как принято определять длительность импульсных сигналов?
8. Объясните понятие занимаемой и необходимой полосы частот.
9. Приведите классификацию сигналов.
10. Объясните необходимость модуляции как основного радиотехнического процесса.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ ЛИНЕЙНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

4.1. Цель работы

Освоение практических навыков работы с моделями основных простейших пассивных звеньев радиотехнических цепей и изучение их импульсных и частотных характеристик.

4.2. Методические указания по выполнению лабораторной работы

В работе исследуются стационарные и переходные характеристики линейных четырехполюсников (RC -цепей).

Теоретические сведения

Электрическая цепь – это совокупность соединенных определенным образом элементов, устройств и объектов, образующих путь для прохождения электрического тока.

Электрические цепи, применяемые в радиотехнике, называются радиотехнические электрические цепи.

Активная цепь – это электрическая цепь, содержащая электронные элементы, способные усиливать подводимые к ней колебания.

Апериодическая цепь – это электрическая цепь, частотная характеристика которой не имеет явно выраженных максимумов (резонансов).

Пассивная цепь – это электрическая цепь, не содержащая источников электрической энергии.

Входная цепь – это электрическая цепь на входе узла, блока, устройства или системы, воспринимающая входной сигнал.

Входная цепь радиоприемника – это электрическая цепь, предназначенная для передачи радиочастотного сигнала от антенны в последующие цепи радиоприемника и предварительного ослабления помех.

Дифференцирующая цепь – это электрическая цепь, сигнал на выходе которой равен (или пропорционален) производной от входного сигнала.

Интегрирующая цепь – это электрическая цепь, сигнал на выходе которой равен (или пропорционален) интегралу от входного сигнала.

Четырехполюсник – часть электрической цепи, имеющая две пары зажимов (или полюсов), которые могут быть входными или выходными.

Активный четырехполюсник – это четырехполюсник, имеющий в своих ветвях усилительные электронные приборы.

Все пропускающий – это четырехполюсник, модуль коэффициента передачи которого постоянен и не зависит от частоты.

Линейный – это четырехполюсник, у которого существует прямая пропорциональность между входным и выходным напряжениями, а также между выходным током и входным напряжением.

Пассивный – это четырехполюсник, не содержащий в своих ветвях источников энергии.

Симметричный – это четырехполюсник, параметры которого не изменяются при перемене местами его входных или выходных зажимов.

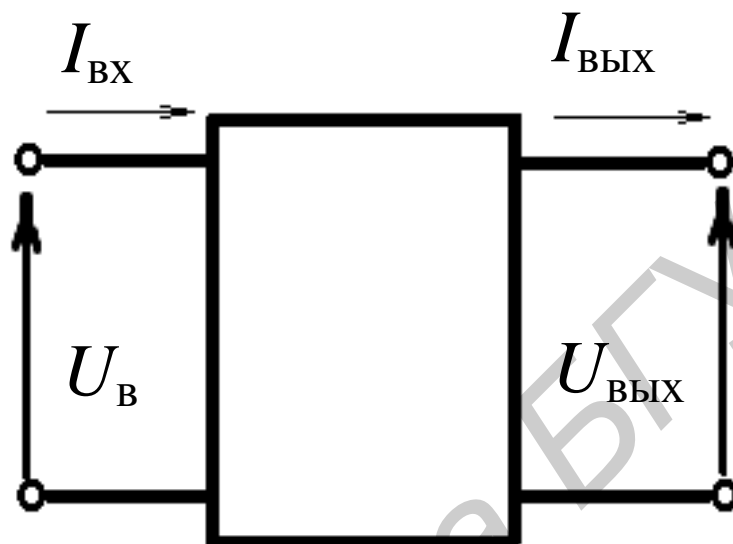


Рис. 4.1. Электрическая цепь: четырехполюсник

Электрические цепи состоят из активных и пассивных элементов. *Активные элементы* способны усиливать мощность колебаний, подводимых к ним. *Пассивные элементы* могут лишь изменить форму электрических сигналов.

К пассивным элементам относятся резисторы (сопротивление измеряется в омах), катушки индуктивности (индуктивность измеряется в генри), конденсаторы (емкости измеряются в фарадах).

Мгновенные значения напряжений $u(t)$ и токов $i(t)$ в этих элементах связаны следующими соотношениями:

$$u_R = iR, \quad (4.1)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt}, \quad (4.2)$$

$$u_c = \frac{1}{C}. \quad (4.3)$$

Аргумент t в функциях напряжения и тока здесь опущен – для удобства восприятия.

Свойства линейных цепей (линейных четырехполюсников) можно определить с помощью такого параметра, как *частотный коэффициент пере-*

дачи, который равен отношению амплитуды напряжения на выходе четырехполюсника к амплитуде напряжения на входе:

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}. \quad (4.4)$$

Здесь используются понятия комплексных амплитуд входного $U_{\text{ВХ}}$ и выходного гармонических напряжений. Комплексные амплитуды зависят от угловой частоты ω , поэтому их часто записывают через общепринятые обозначения:

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}(\omega), \quad (4.5)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}(\omega). \quad (4.6)$$

Частотный коэффициент передачи (чаще просто *коэффициент передачи*) линейной цепи (линейного четырехполюсника) определяется следующим образом:

$$K(\omega) = \dot{K}(\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = |K(\omega)|e^{i\varphi(\omega)}. \quad (4.7)$$

Модуль коэффициента передачи $|K(\omega)|$ называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), а аргумент $\varphi(\omega)$ – фазочастотной характеристикой (ФЧХ) линейного четырехполюсника. Как правило, АЧХ имеет один максимум, а ФЧХ изменяется монотонно при изменении частоты (рис. 4.2).

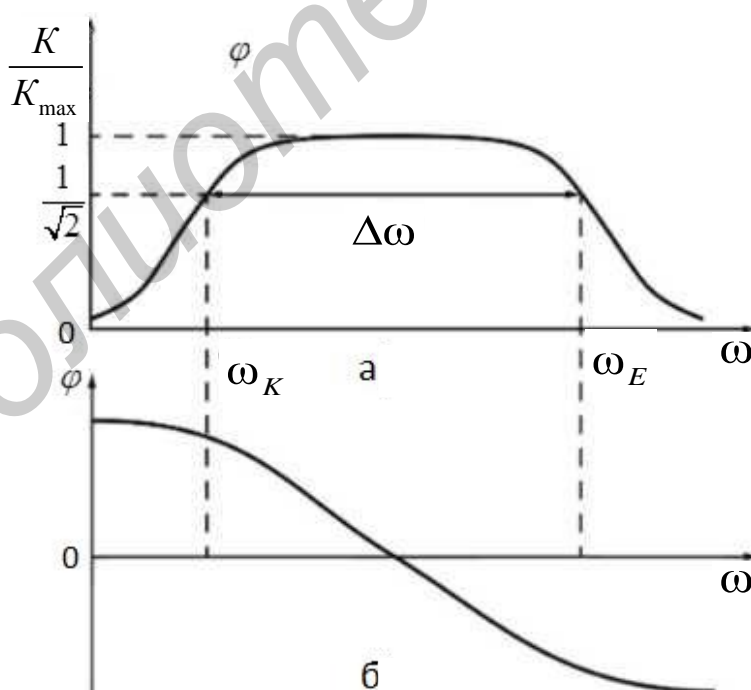


Рис. 4.2. Характеристики линейной цепи:
а – амплитудно-частотная (АЧХ); б – фазочастотная (ФЧХ)

В области некоторой полосы частот отклик линейной цепи на входное воздействие начинает уменьшаться. В связи с этим используют понятие полосы пропускания (рабочей полосы) – области частот, где модуль коэффициента передачи $|K(\omega)|$ имеет не менее $\frac{1}{\sqrt{2}}$ от своего максимального значения. Часто при практических расчетах используют нормированный модуль коэффициента передачи K/K_{\max} , максимальное значение которого равно единице. Значение $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$, по которому определяют полосу пропускания линейной цепи, введено не случайно. Дело в том, что на границах полосы пропускания модуль коэффициента передачи по мощности, равный отношению выходной и входной мощностей, уменьшается в два раза.

На рис. 4.2 полоса пропускания линейной цепи заключена в области от нижней ω_k до верхней ω_E круговой частоты, и поэтому ее ширина определяется как $\Delta\omega = \omega_E - \omega_k$. При практических расчетах часто пользуются не круговой, а циклической частотой $f = \omega / (2\pi)$. В этом случае полоса пропускания цепи

$$\Delta f = f_n - f_b, \quad (4.8)$$

где f_n – нижняя и f_b – верхняя граничные частоты.

Дифференцирование и интегрирование сигналов

В различных радиоэлектронных устройствах и системах передачи информации часто встречается необходимость в преобразовании сигналов, имеющем характер дифференцирования или интегрирования. Поскольку дифференцирование и интегрирование – это линейные математические операции, такие преобразования возможны в линейных цепях. При определенных условиях для этого пригодны простейшие цепочки, содержащие обычные резисторы и конденсаторы.

Дифференцирующие цепи

Рассмотрим одну из схем простейшего линейного четырехполюсника последовательную электрическую RC-цепь (рис. 4.3).

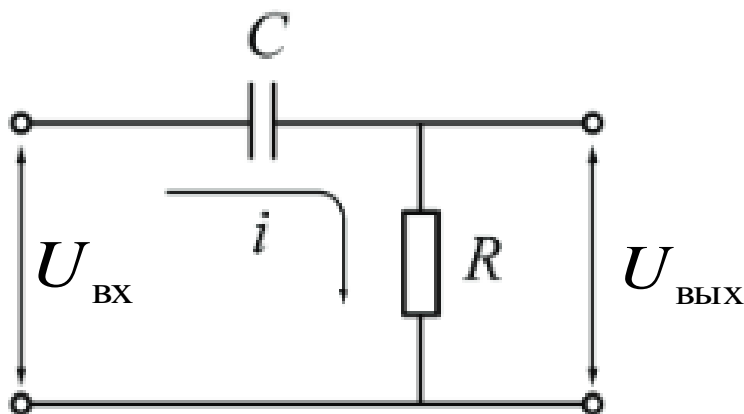
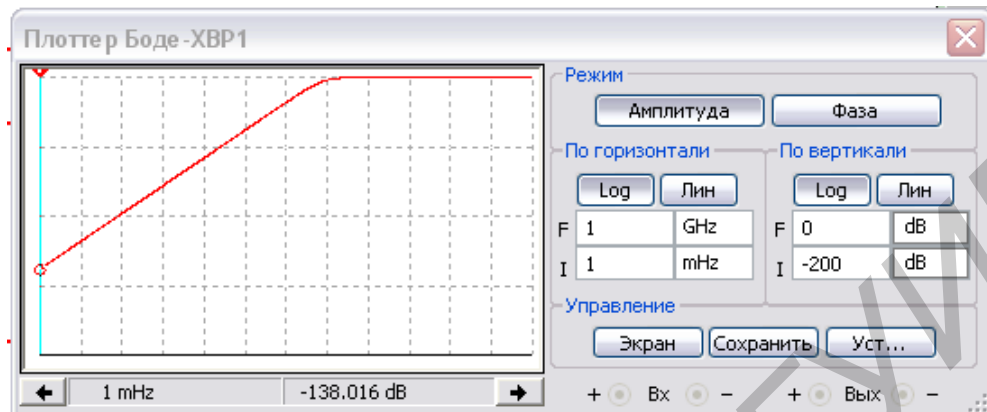
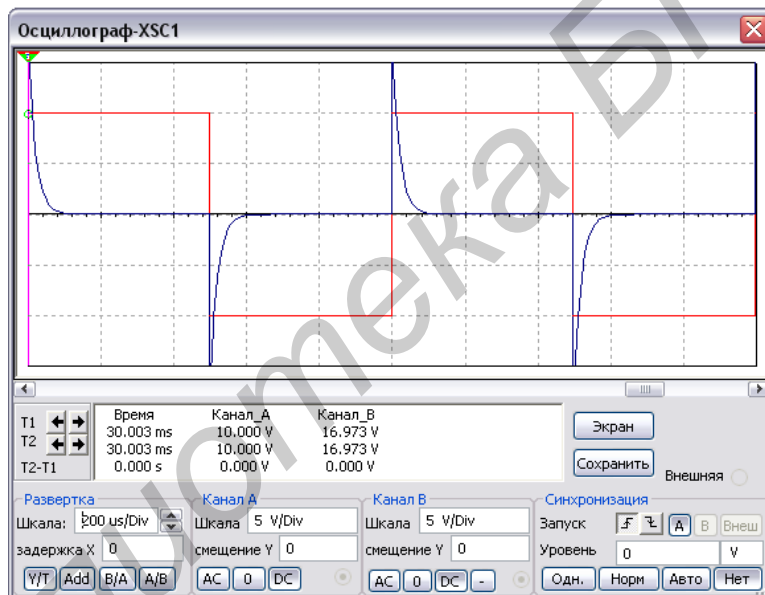


Рис. 4.3. Дифференцирующая цепь

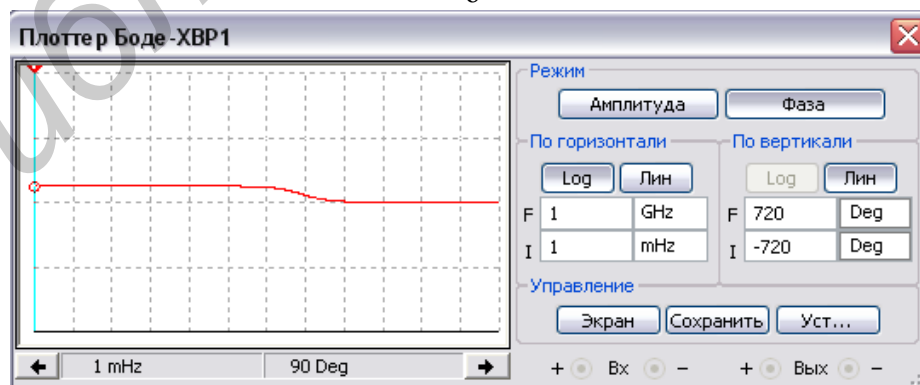
На рис. 4.4 приведен график АЧХ дифференцирующей цепи. Верхнюю граничную частоту полосы пропускания интегрирующей цепи можно определить, из графика АЧХ (рис. 4.4) видно, что дифференцирующая цепь пропускает высокие частоты, задерживая низкие, т. е. является *фильтром верхних частот* (ФВЧ).



а



б



в

Рис. 4.4. Фильтр верхних частот:
а – амплитудно-частотная характеристика; б – временные диаграммы;
в – фазочастотная характеристика

Полоса пропускания дифференцирующей цепи ограничена только со стороны низких частот. Приравняв правую часть (4.8) к $\frac{1}{\sqrt{2}}$, вычислим граничную частоту пропускания:

$$\omega_n = \frac{1}{\tau}. \quad (4.9)$$

Применительно к фильтрам, граничные частоты полосы пропускания называют *частотами среза* фильтра.

Интегрирующие цепи

RC-цепь, в которой выходной сигнал снимается с конденсатора С, называется *интегрирующей цепью* (рис. 4.5).

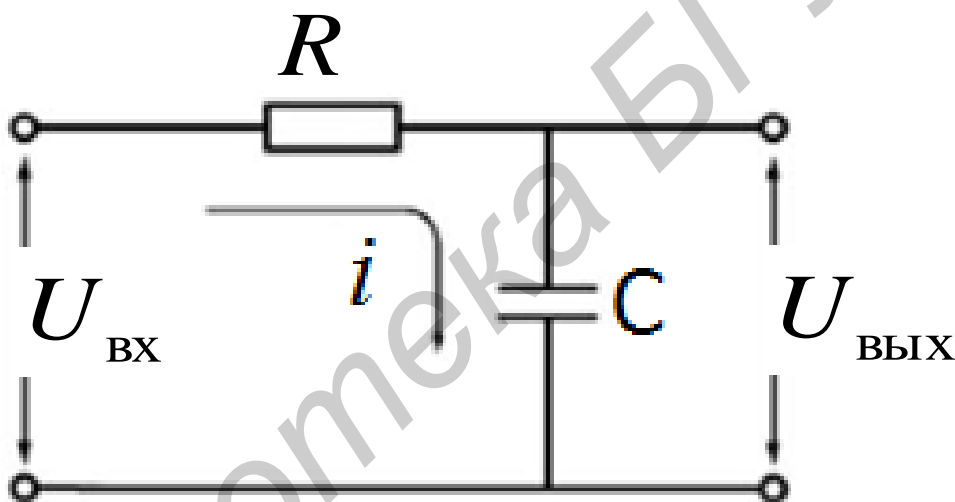
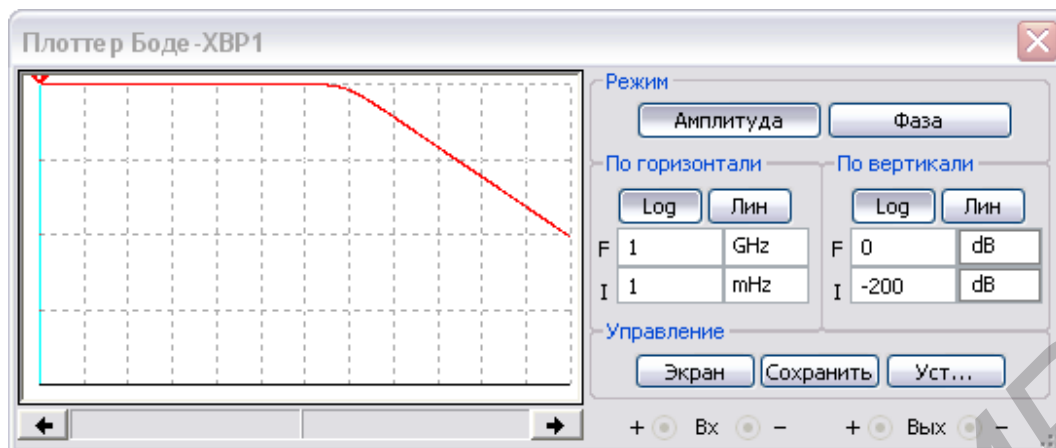
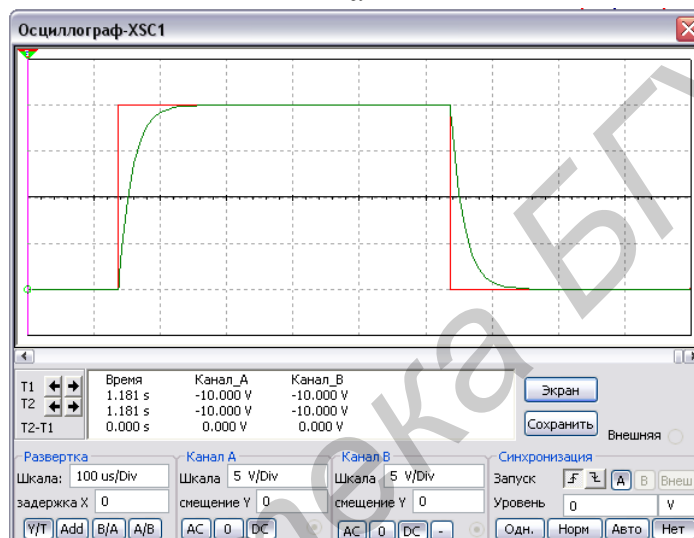


Рис. 4.5. Интегрирующая цепь

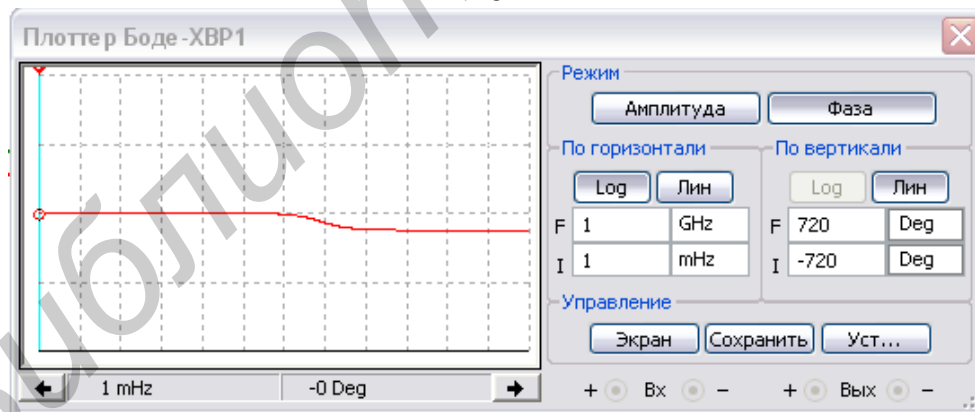
График АЧХ интегрирующей цепи приведен на рис. 4.6.



а



б



в

Рис. 4.6. Фильтр нижних частот:

а – амплитудно-частотная характеристика; б – временные диаграммы;
в – фазочастотная характеристика

Из рис. 4.6 следует, что интегрирующая цепь пропускает низкие частоты, задерживая высокие, т. е. является *фильтром нижних частот* (ФНЧ).

Верхнюю граничную частоту полосы пропускания интегрирующей цепи можно определить из формулы

$$\omega_E = \frac{1}{\tau}$$

В радиоэлектронных устройствах такие цепи используют в качестве так называемых *сглаживающих (smoothing)*, или *низкочастотных фильтров*.

Мост Вина

Если полоса пропускания ($\Delta f = f_B - f_H$) широка и сравнима со средней геометрической частотой $f_{cp}^2 = f_B \cdot f_H$, или если $f_B / f_H > 2$, то полосовой фильтр может быть составлен из последовательно соединенных ФНЧ и ФВЧ, у которых имеется перекрывающийся участок характеристики $K(\omega)$. При этом необходимо разделять ФНЧ и ФВЧ повторителем, чтобы избежать взаимного влияния.

Если же $f_B / f_H > 1$, то применяют специальные полосовые фильтры.

Простейший пассивный полосовой фильтр – это мост Вина (рис. 4.7).

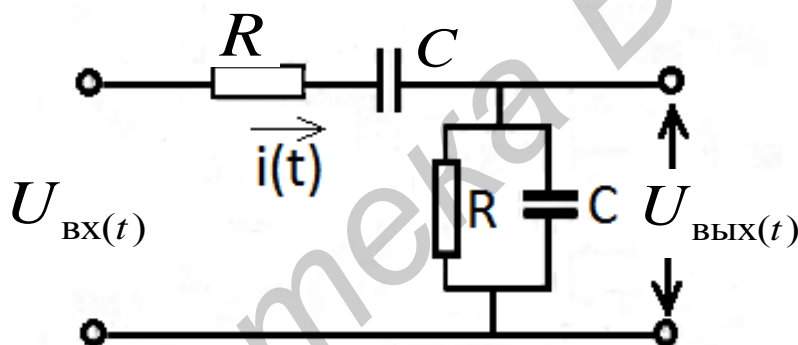


Рис. 4.7. Мост Вина

Особенность моста Вина (которая позволяет использовать его как полосовой фильтр) в том, что на определенной частоте ω_p (которая называется частотой квазирезонанса) АЧХ моста имеет максимум.

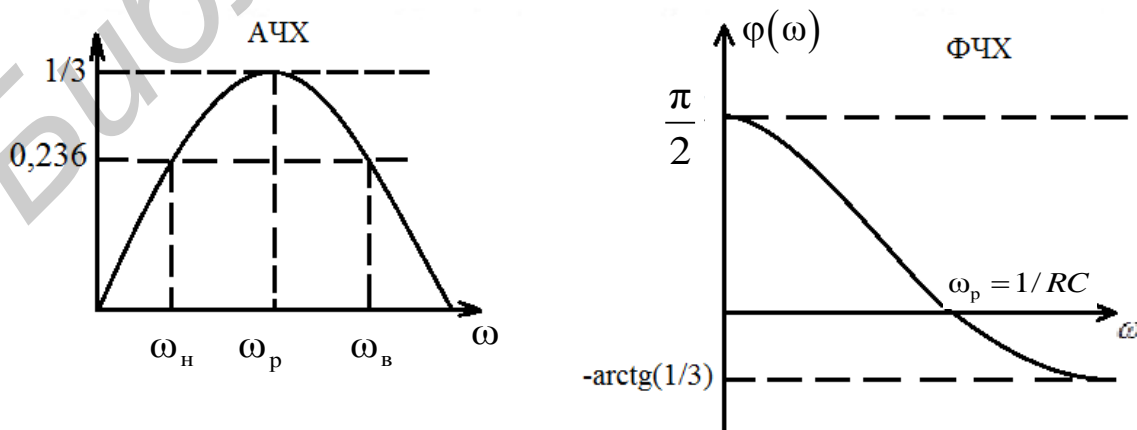


Рис. 4.8. Нижняя и верхняя частоты среза АЧХ и ФЧХ

Мост Вина может использоваться как фильтр. Однако данный фильтр (по сравнению с большинством других полосно-пропускающих) имеет широкую полосу пропускания, что является его большим недостатком, но ему все же находится применение, т. к. он не содержит катушек индуктивности и микросхем, в связи с чем может иметь малые размеры и прост в изготовлении. Также мост Вина применяется в цепях обратных связей генераторов синусоидальных (или точнее псевдосинусоидальных (нелинейные искажения велики)) колебаний. Например, мосты Вина могут использоваться в звуковых синтезаторах.

Объект исследования

Схемы радиотехнических цепей, используемые в лабораторной работе, приведены на рис. 4.3, 4.5, 4.7.

Назначение схемных элементов

V_1 – источник переменного напряжения.

R_1 – резистор, входящий в состав RC -цепи.

C_1 – конденсатор, входящий в состав RC -цепи.

Измерительные приборы

XSC1 – осциллограф; используется для контроля формы сигнала на выходе генератора переменного напряжения.

Экспериментальное исследование

В данной лабораторной работе рассматриваются RC -цепи разных видов:

1. Дифференцирующая цепь.
2. Интегрирующая цепь.
3. Сложная цепь (мост Вина).

Задание 1

Рассчитать и построить амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики дифференцирующей и интегрирующей цепей. Для этого воспользоваться следующей формулой, где τ – постоянная времени цепи:

$$\tau = RC.$$

Задание 2

Расчет постоянной времени цепи провести для величин сопротивления и емкости, соответствующих варианту – номер варианта соответствует номеру лабораторной подгруппы (указывается преподавателем).

Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики рассчитываются по формулам:

– для *дифференцирующей* цепи:

$$|\dot{K}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau)^2}}},$$

$$\arg \dot{K}(\omega) = \varphi(\omega) = -\arctg\omega\tau;$$

– для *интегрирующей* цепи:

$$|\dot{K}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}},$$

$$\arg \dot{K}(\omega) = \varphi(\omega) = -\arctg\omega\tau.$$

Задание 3

Расчитать переходные характеристики дифференцирующей и интегрирующей цепей.

Расчет ведется по следующим формулам:

– для *дифференцирующей* цепи:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = Ee^{-t/\tau};$$

– для *интегрирующей* цепи:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = E(1 - e^{-t/\tau}).$$

Считается, что переходный процесс в цепи закончился, если $e^{-t/\tau} = 0,05$. Это означает, что время переходного процесса, по истечении которого можно считать, что процесс закончился, $\tau_n = 3\tau$. В момент окончания переходного процесса напряжение на выходе равно:

– для *дифференцирующей* цепи:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = 0,05E;$$

– для *интегрирующей* цепи:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = 0,95E.$$

Экспериментальные задания

Задание 1

Снять амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики дифференцирующей и интегрирующей цепей. Сравнить их с расчетными характеристиками.

Задание 2

Снять амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики сложной цепи (моста Вина).

Задание 3

Просмотреть и зарисовать эпюры напряжения на выходе дифференцирующей, интегрирующей и сложной цепей при подаче на вход периодической последовательности прямоугольных импульсов. Сравнить их с расчетными переходными характеристиками.

Задание 4

Просмотреть и зарисовать эпюры напряжения на выходе сложной цепи при подаче на вход периодической последовательности прямоугольных импульсов.

Задание 5

Исследование дифференцирующей RC -цепи.

1. Собрать схему дифференцирующей RC -цепи (рис. 4.9).

Номиналы сопротивления и емкости во всех последующих схемах установить в соответствии с вариантом задания.

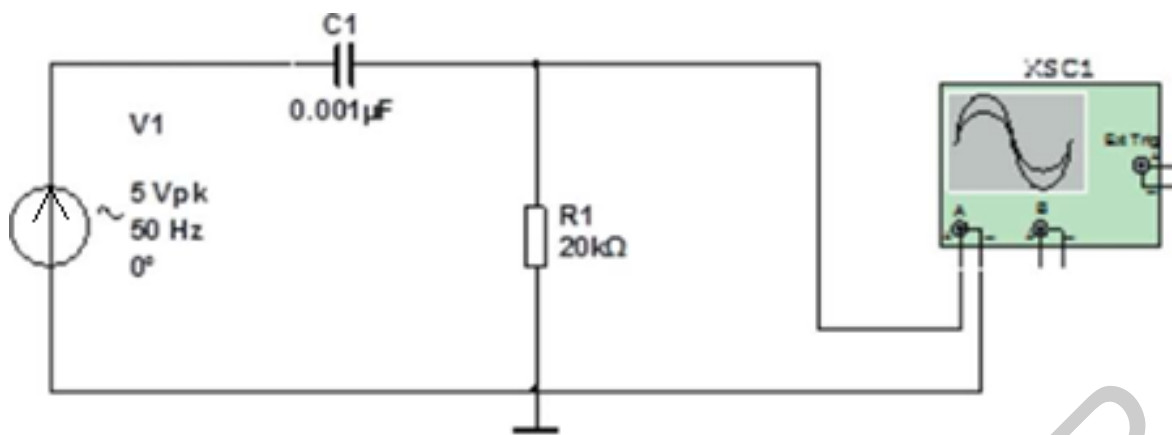


Рис. 4.9. Схема дифференцирующей RC -цепи

Установить параметры генератора: амплитуда сигнала 5 В.

Меняя частоту сигнала от 50 Гц до 20 кГц, снять амплитудно-частотную характеристику цепи. Шаг изменения частоты выбирать в соответствии с характером и скоростью изменения коэффициента передачи.

Важно! Сохранить схему (она понадобится в дальнейшем).

2. Заменить в схеме осциллограф на плоттер Бодэ (рис. 4.10).

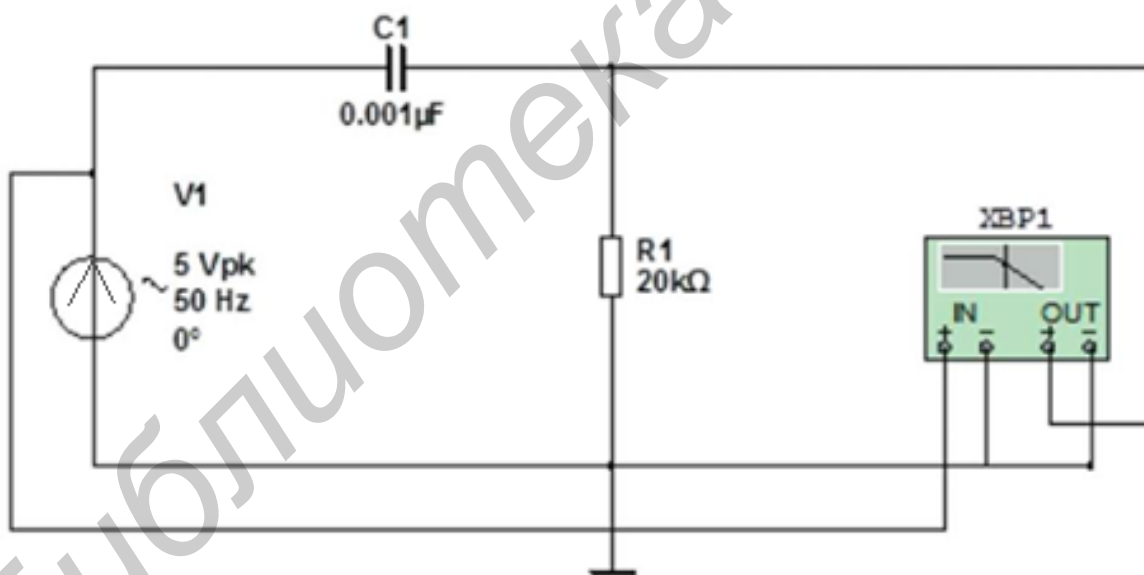


Рис. 4.10. Схема для измерения частотных характеристик дифференцирующей RC -цепи при помощи плоттера Бодэ

Снять амплитудно-частотную характеристику цепи. Сравнить ее с характеристикой, полученной в п. 1.

3. Переключить плоттер Бодэ в режим измерения фазы. Снять фазочастотную характеристику дифференцирующей цепи.

Результаты представить в виде графиков.

Задание 6

Исследование интегрирующей RC-цепи

1. Собрать схему интегрирующей RC-цепи (рис. 4.11).

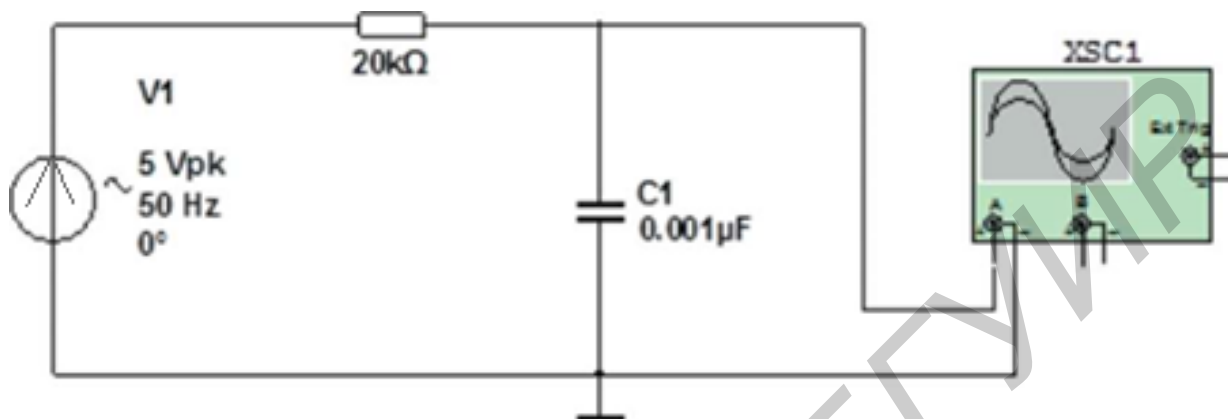


Рис. 4.11. Схема интегрирующей RC-цепи

Установить параметры генератора: амплитуда сигнала 5 В.

Повторить измерения, сделанные в п. 1–3 задания 5. Для выполнения пп. 2 и 3 необходимо изменить схему согласно рис. 4.12.

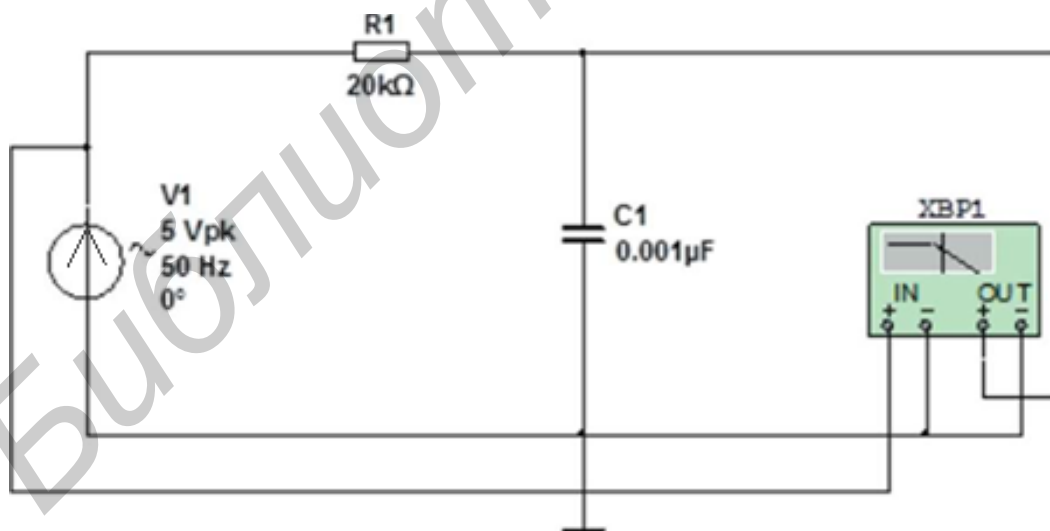


Рис. 4.12. Схема для измерения частотных характеристик интегрирующей RC-цепи при помощи плоттера Боде

Важно! Сохранить схему (она понадобится в дальнейшем).
Полученные результаты представить в виде графиков.

Задание 7

Исследование сложной RC -цепи (моста Вина)

1. Собрать схему сложной RC -цепи (моста Вина) (рис. 4.13).

Провести наблюдение эпюр напряжения на выходе цепи при трех значениях длительности импульсов.

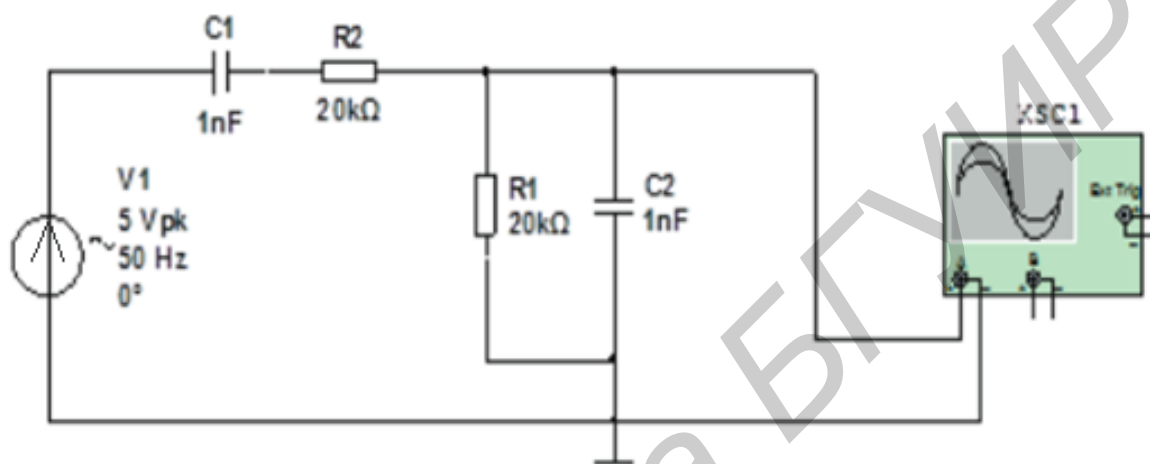


Рис. 4.13. Схема сложной RC -цепи (моста Вина)

Установить параметры генератора амплитуда сигнала 5 В.

Повторить измерения, сделанные в пп. 1–3 задания 5.

Важно! Сохранить схему (она понадобится в дальнейшем).
Полученные результаты представить в виде графиков.

Задание 8

Наблюдение эпюр напряжения на выходе RC -цепей

1. Дифференцирующая RC -цепь.

Собрать схему дифференцирующей RC -цепи для наблюдения эпюр напряжения. Для этого загрузить схему, сохраненную в п. 1 задания 5.

Вместо генератора синусоидального напряжения включить в схему генератор импульсов.

Рассчитав для RC -цепи постоянную времени $\tau = RC$, провести наблюдение эпюр напряжения на выходе цепи при трех значениях длительности импульсов:

- 1) $\tau_{\text{имп}} = 0,1\tau$;
- 2) $\tau_{\text{имп}} = \tau$;
- 3) $\tau_{\text{имп}} = 10\tau$.

Частоту повторения импульсов установить равной $2,5\tau_{\text{имп}}$.

Зарисовать эпюры напряжения.

Исходя из теории RC -цепей выяснить, при каком соотношении между $\tau_{\text{имп}}$ и τ RC -цепь осуществляет удовлетворительное дифференцирование прямоугольных импульсов. Установить, какое из трех соотношений этому соответствует.

2. Интегрирующая RC -цепь.

Повторить измерения п. 1, зарисовать эпюры напряжения. Постоянную τ рассчитывать по данным из табл. 4.1.

Таблица 4.1

Варианты заданий параметров
линейной RC -цепи

Номер варианта	Сопротивление R , кОм	Емкость C , пФ
1	20	1000
2	15	1400
3	25	800
4	30	600
5	22	900
6	35	500
7	18	1100
8	16	1200
9	10	1800
10	28	700

4.3. Приборы и оборудование

Персональный компьютер. Средство программной разработки, моделирования и отладки электрических цепей Multisim.

4.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы для исследования характеристик RC -цепей.
3. Расчетные данные (постоянная времени, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика) привести для двух RC -цепей – дифференцирующей и интегрирующей.
4. Экспериментальные графики (амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика) для трех RC -цепей – дифференцирующей, интегрирующей и сложной – при возбуждении колебаний генератором переменного (гармонического) напряжения.
5. Экспериментальные графики откликов трех RC -цепей на возбуждение генератором прямоугольных импульсов.

4.5. Контрольные вопросы и задания

1. Начертить схемы дифференцирующей и интегрирующей RC -цепей.
2. Объяснить амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики дифференцирующей и интегрирующей RC -цепей.
3. Объяснить переходные характеристики дифференцирующей и интегрирующей RC -цепей. Показать вид переходного процесса для дифференцирующей и интегрирующей RC -цепей в случае подачи на их вход импульсов разной длительности.
4. Определение моста Вина.

Библиотека БГУИР

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИОСИГНАЛОВ НА ЛИНЕЙНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

5.1. Цель работы

Освоение практических навыков работы с моделью одного из основных простейших активных звеньев радиотехнических цепей – резонансного усилителя, изучение его усилительных свойств и частотных характеристик, а также исследование параметров выходного радиосигнала.

5.2. Методические указания по выполнению лабораторной работы

Теоретические сведения

Транзистор (от англ. transfer – переносить и resistor – сопротивление), электронный прибор на основе полупроводникового кристалла, имеющий три (или более) вывода, предназначенный для генерирования и преобразования электрических колебаний. Транзистор – один из основных активных (способных усиливать входной сигнал по мощности за счет использования внешнего источника питания) компонентов схем. Существует два больших класса транзисторов: биполярные (в физических процессах участвуют два типа носителей) и полевые, или униполярные (в переносе заряда участвуют носители одного типа). Биполярные транзисторы бывают двух типов: *n-p-n* и *p-n-p*. Буквы обозначают тип примеси в эмиттерной, базовой и коллекторной областях соответственно. В класс полевых транзисторов включаются транзисторы с *p-n*-переходом и транзисторы со структурой «металл – диэлектрик – полупроводник» (МДП). В кремниевых транзисторах в качестве диэлектрического слоя используется окисел кремния. Поскольку подавляющее большинство полевых транзисторов кремниевые, то часто их называют МОП-транзисторами (металл – окисел – полупроводник).

В транзисторных схемах один вывод транзистора используется для входного сигнала, другой – для выходного, а третий вывод – общий для входного и выходного сигналов. При этом из шести возможных конфигураций только три дают увеличение полезной мощности. Это схемы с общим эмиттером, общей базой и общим коллектором (рис. 5.1).

Каждая из этих конфигураций имеет свои уникальные схемные преимущества, поэтому выбор конфигурации зависит от требуемых значений входного и выходного сопротивлений, коэффициентов усиления по току и напряжению.

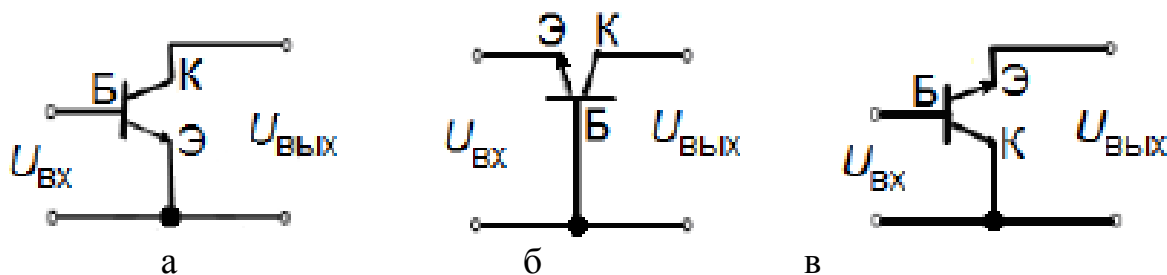


Рис. 5.1. Схема включения транзистора:
а – с общим эмиттером; б – с общей базой; в – с общим коллектором

5.3. Порядок выполнения работы

1. Соберите схему усилителя тока, показанную на рис. 5.2, а. Рассчитайте h_{21} при нескольких значениях I_B и I_K , после чего попробуйте различные значения R (1 МОм, 470 кОм, 100 кОм). Оцените в каждом случае U_B с помощью осциллографа.

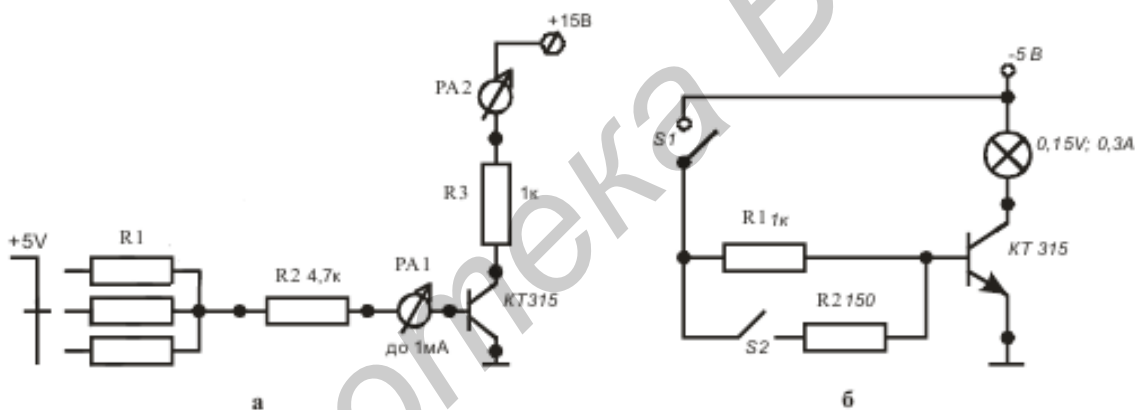


Рис. 5.2. Схемы для измерения усилителей тока (а)
и транзисторного ключа (б)

2. Соберите схему транзисторного ключа (рис. 5.2, б). Транзистор в данной схеме работает следующим образом. Когда контакт переключателя $S1$ разомкнут – ток базы мал. Следовательно, I_K тоже мал и лампочка горит в полнакала. Когда переключатель $S1$ замыкается, лампа загорается. Напряжение на базе составляет 0,6 В. Измерьте напряжение U_K насыщения, для чего подключите параллельно резистору в 1 кОм резистор 150 Ом (переключатель $S2$ – в положение ВКЛ.) и отметьте изменение U_K . Типичные значения напряжения насыщения лежат в диапазоне 0,05–0,2 В.

3. Соберите схемы эмиттерных повторителей, показанных на рис. 5.3. Подайте на вход синусоидальный сигнал и наблюдайте с помощью осциллографа сигнал на выходе. Зарисуйте его. Теперь присоедините точку 1 схемы не к земле, а к источнику 12 В и снова зарисуйте выходной сигнал. Объясните, что получилось.

Эмиттерный повторитель назван так потому, что выходной сигнал снимается с эмиттера, напряжение на котором равно входному напряжению минус падение напряжения на переходе база – эмиттер. На первый взгляд эта схема может показаться бесполезной, но это не так. У нее входное сопротивление значительно больше, чем выходное. Из этого следует, что источник сигнала будет отдавать меньшую мощность, если нагрузку подключить к нему не непосредственно, а через эмиттерный повторитель. Таким образом, эмиттерный повторитель обеспечивает усиление по току, а не по напряжению.

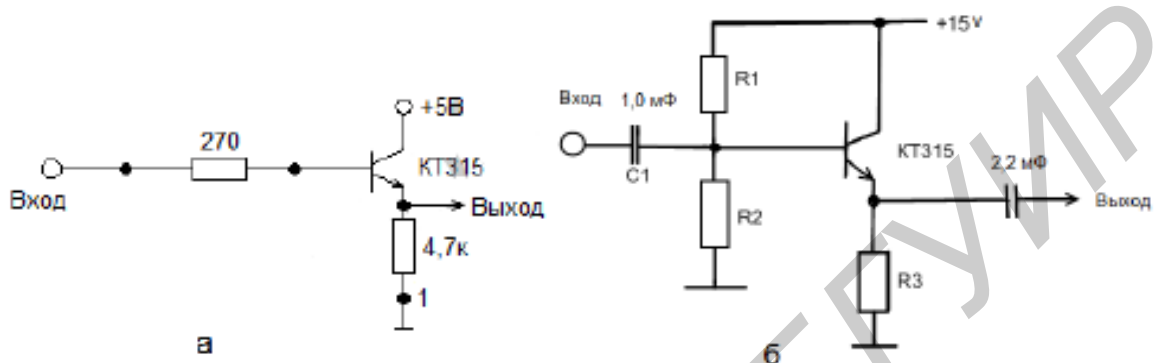


Рис. 5.3. Эмиттерные повторители:
а – без смещения; б – со смещением

Чтобы потенциал на эмиттере был равен половине $U_{пит}$ (рис. 5.3, б) надо, чтобы $R1$ и $R2$ были равны. Процесс выбора рабочих напряжений в схеме называется выбором рабочей точки. Обязательно должно быть выполнено условие, чтобы ток, протекающий через делитель, был больше тока базы.

4. Соберите схему усилителя с общим эмиттером (рис. 5.4).

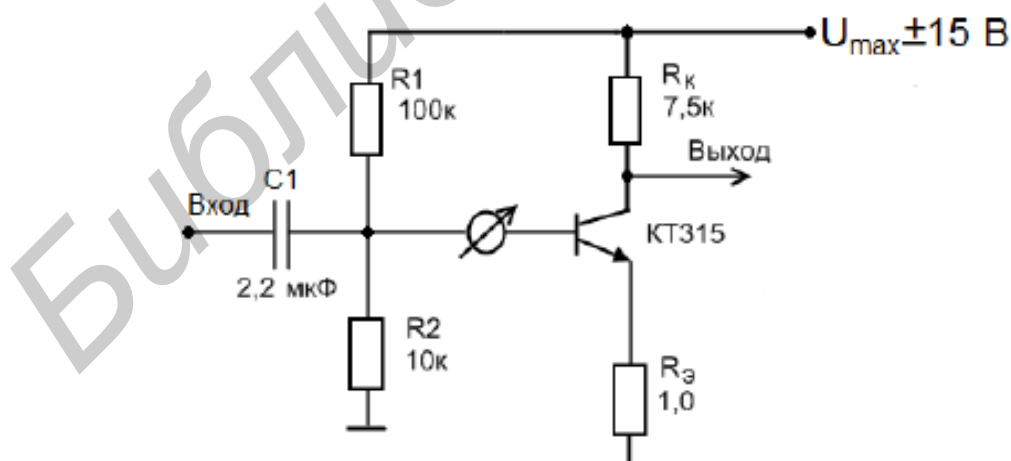


Рис. 5.4. Схема с общим эмиттером

Нагрузкой в данном каскаде является резистор R_k . Конденсатор $C1$

выбран так, что фильтр высоких частот, образованный этим конденсатором и резисторами $R1$ и $R2$, соединенными с ним последовательно, пропускает все нужные частоты. $R1$ и $R2$ обычно выбирают таким образом, чтобы входное сопротивление каскада было достаточно большим. Иначе говоря,

$$(R1||R2)C > 1/2\pi f. \quad (5.1)$$

Измерьте напряжение на базе и определите ток покоя базы.

Благодаря смещению, приложенному к базе, через транзистор протекает коллекторный ток покоя. Этот ток создает на коллекторе напряжение U_K , равное разности и падению напряжения на $R_K(U)$.

Измерьте напряжение на коллекторе и определите I_K покоя, равный

$$I_K = (U_{пит} - U_K)/R_K. \quad (5.2)$$

Подадим на базу переменный сигнал частотой 1 кГц, напряжением 0,1 В и посмотрим напряжение на эмиттере и коллекторе (если будут ограничения и искажения, $U_б$ надо уменьшить). Отметим, что напряжение на эмиттере повторяет напряжение на базе и вызывает изменение эмиттерного тока:

$$I_э = I_K I_б \quad (5.3)$$

и приблизительно такое же изменение коллекторного тока. Изменяется и напряжение на коллекторе:

$$U_K = I_K R_K - U_б R_K / R_э. \quad (5.4)$$

Определите с помощью осциллографа изменение $U_K, U_б, U_э$. Последнее выражение можно переписать следующим образом:

$$(U_K - U_{вых}) / (U_б - U_{вх}) \dots R_K / R_э \quad (5.5)$$

Схема представляет собой усилитель напряжения. Рассчитайте экспериментальный коэффициент усиления схемы. Знак минус говорит о том, что положительный сигнал на входе дает на выходе отрицательный сигнал и наоборот.

Нетрудно определить входные и выходные сопротивления каскада. Для входного сигнала схема представляет собой параллельное соединение резисторов $R1$ и R и входного сопротивления со стороны базы. Рассчитайте это сопротивление. Выходное сопротивление определяется как параллельное соединение R_K и выходного сопротивления транзистора со стороны коллектора, которое равно нескольким мегаомам.

5. Если соединить транзисторы, как показано на рис. 5.5, то получится

схема составного транзистора (схема Дарлингтона), которая будет работать как один транзистор, причем его коэффициент усиления будет равен произведению коэффициентов составляющих транзисторов. Этот прием полезен для схем, работающих на больших токах, или каскадов, где необходимо обеспечить большое входное сопротивление. В этой схеме они в два раза больше обычного и она имеет меньшее быстродействие.

Измерьте h_{21} двух транзисторов при их включении в соответствии со схемой на рис. 5.5 и найдите произведение их коэффициентов усиления. Включите эти два транзистора в пару Дарлингтона и определите коэффициент усиления. Измерьте и сравните его с величиной одного транзистора.

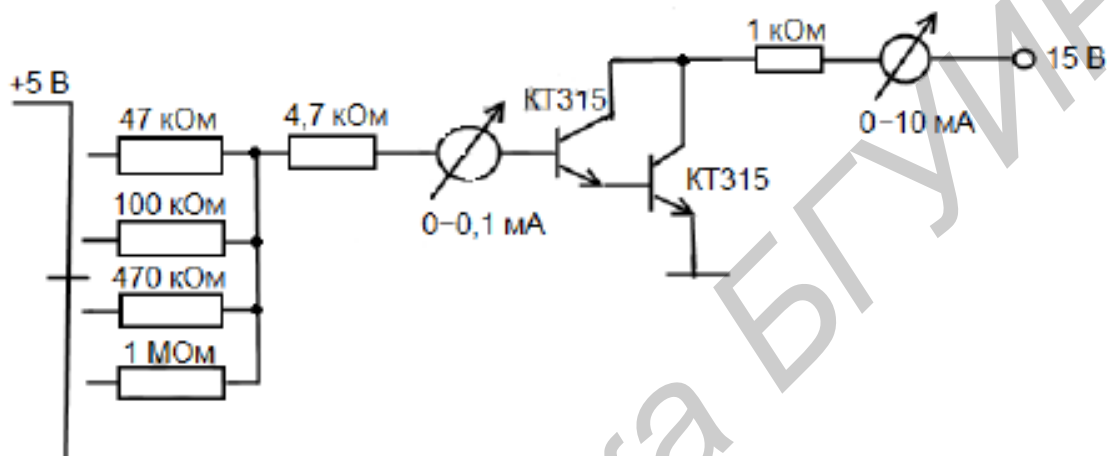


Рис. 5.5. Схема Дарлингтона

5.4. Приборы и оборудование

Персональный компьютер. Средство программной разработки, моделирования и отладки электрических цепей Multisim.

5.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
3. Измерительные схемы.
4. Результаты измерений и расчет.
5. Выводы.

5.6. Контрольные вопросы

1. Основные схемы включения транзисторов.
2. Как работает транзисторный ключ?
3. Достоинства эмиттерного повторителя.
4. Назовите особенности схемы Дарлингтона.

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ

6.1. Цель работы

Освоение практических навыков работы с моделью одного из основных простейших дискретизаторов сигналов и изучение процесса восстановления аналогового сигнала из дискретной последовательности.

6.2. Методические указания по выполнению лабораторной работы

Теоретические сведения

В состав модели экспериментальной установки входят виртуальные генераторы сигналов различной формы, аналоговый перемножитель, осциллограф и исследуемые фильтры.

6.3. Порядок выполнения работы

Структурная схема измерений модели экспериментальной установки приведена на рис. 6.1.

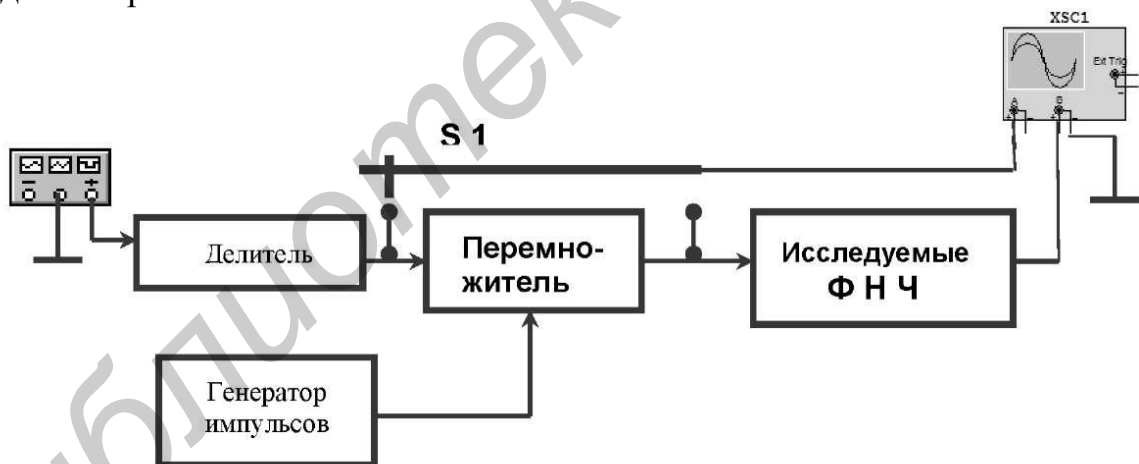


Рис. 6.1. Структурная схема исследования дискретных сигналов

Окно настройки параметров перемножителя мультиплексора представлено на рис. 6.2.

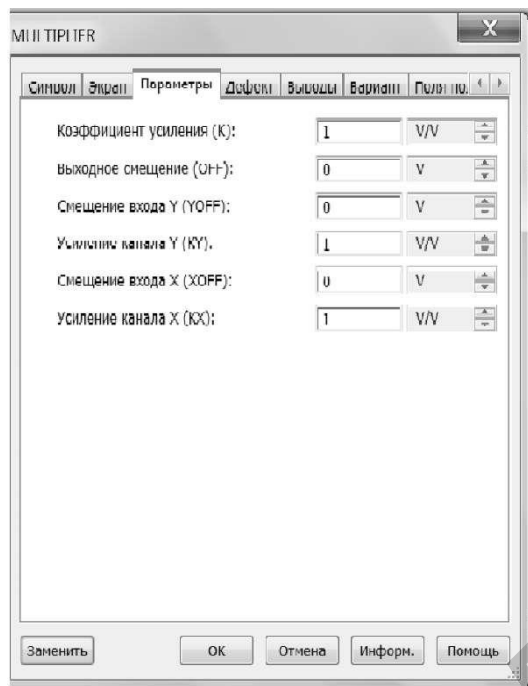


Рис. 6.2. Настройка параметра параметра перемножителя мультиплексора

ЗАМЕЧАНИЕ. Все коэффициенты передачи (усиления) установить равными единице.

1. Рассчитать параметры элементов схем ФНЧ (простейшие RC-фильтры), необходимые для создания моделей фильтров.

2. Рассчитать длительность выборки, число выборок (отсчетов) N и амплитуду выборки дискретного сигнала, если задана длительность аналогового сигнала конечной длительности. Форма сигнала задается в варианте домашнего задания.

3. Оценить ошибку, возникающую при переходе с аналогового сигнала на дискретный сигнал.

4. Подготовить модель к анализу. Для этого:

а) ввести данные для всех элементов исследуемых схем ФНЧ;

б) подключить все необходимые устройства;

в) установить параметры генераторов по данным домашнего задания;

г) установить параметры перемножителя (мультиплексора). Для этого в группе «Control function blocks» выбрать элемент «MULTIPLIER».

5. Включить схему, зарисовать осциллограммы аналогового и дискретного сигналов.

ВНИМАНИЕ! Моделью генератора может служить источник прямоугольных импульсов, длительность которых не должна превышать пяти процентов от периода последовательности.

6. Сформировать аналоговый сигнал:

а) выход мультиплексора подключить поочередно к входам ФНЧ;

б) зарисовать осциллограммы аналогового сигнала для исследуемых фильтров ФНЧ при двух значениях длительности выборки;

- в) измерить уровень и длительность сигналов;
- г) оценить влияние количества выборок на форму сигнала;
- д) отметить характерные искажения сигнала;
- е) оценить влияние граничной частоты фильтров на форму восстановленного сигнала;
- ж) оценить влияние формы АЧХ фильтра на форму восстановленного сигнала.

7. Снять и построить АЧХ фильтров нижних частот.

Для этого необходимо к входу исследуемого ФНЧ подключить источник гармонических колебаний. Снять семейство частотных характеристик, используя режим многократного анализа схем. Определить граничные частоты фильтров.

6.4. Приборы и оборудование

Персональный компьютер. Средство программной разработки, моделирования и отладки электрических цепей Multisim.

6.5. Содержание отчета

1. Структурная схема измерений.
2. Принципиальные электрические схемы исследуемых ФНЧ.
3. Семейства АЧХ и ФЧХ фильтров в зависимости от изменяемого параметра.
4. Осциллограмма входных и выходных сигналов.
5. Оптимальная (по критерию минимума линейных искажений) АЧХ.
6. Выводы по результатам анализа.

6.6. Контрольные вопросы

1. Как рассчитать число отсчетов дискретного сигнала?
2. Приведите импульсную и частотную характеристики идеально восстанавливающего фильтра. Можно ли физически реализовать такой фильтр?
3. Какие сигналы называются дискретными? Объясните, почему они находят широкое применение.
4. Какие параметры и как влияют на граничные частоты фильтров?
5. Объясните влияние нагрузки фильтров на форму АЧХ.

Лабораторная работа №7

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТИПОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ

7.1. Цель работы

Изучение физического макетирования радиотехнических цепей. Исследование работы типовых радиоэлектронных блоков.

7.2. Методические указания по выполнению лабораторной работы

Теоретические сведения

Блок – эксплуатационно-неавтономная, но схемно и конструктивно законченная часть устройства, выполняющая самостоятельную функцию и представляющая собой совокупность узлов или группы элементов и деталей (например блок конденсаторов переменной емкости). Блок, предназначенный для реализации функций передачи, приема и преобразования информации или преобразования сигналов, называется радиоэлектронным блоком.

Для выбора и применения резисторов в конструкциях радиоэлектронных блоков их классифицируют по характеру изменения сопротивления, назначению и материалу резистивного элемента.

В соответствии с ГОСТ сокращенное обозначение резисторов состоит из трех элементов. Полное условное обозначение резисторов состоит из сокращенного, после которого для постоянных резисторов указывают номинальную мощность рассеяния, номинальное сопротивление, допустимое отклонение сопротивления в процентах, группу по уровню шумов (для непроволочных резисторов), группу по температурному коэффициенту сопротивления, обозначение климатического исполнения. На резисторы наносится буквенно-цифровая (или цветовая) маркировка. Она содержит номинальную мощность, номинальное сопротивление, допуск и дату изготовления. Номинальное сопротивление обозначается цифрами с указанием единицы измерения:

- Ом (R, или H по старому, или вообще без буквы) – омы;
- кОм (K) – килоомы, МОм (M) – мегаомы;
- ГОм (G) – гигаомы, ТОм (T) – тераомы.

Буква обозначает множитель и определяет положение запятой десятичного знака. Полное обозначение допуска состоит из цифр, а кодирование – из букв. Для наиболее распространенных допусков используется кодировка, приведенная в табл. 7.1. Маломощные композиционные и пленочные резисторы с допуском от 2 до 20 % имеют стандартную схему цветной маркировки. При этом на резистор наносят пять цветных полосок (рис. 7.1). Первые две цветные полоски определяют первые

две цифры номинального сопротивления, третья полоска – множитель, четвертая – допуск, пятая – уровень надежности (желтого или оранжевого цвета) или другие параметры.

Таблица 7.1

Кодированное обозначение номинального сопротивления,
допуска и примеры обозначения

Сопротивление		Допуск		Примеры обозначения	
Множитель	Код 4	Допуск, %	Код	Полное обозначение	Код
1	К(Е)	±0,1	В(Ж)*	3,9 Ом ± 5 %	3R9J
		±0,25	С(У)	215 Ом ± 2 %	215RG
10 ³	К(К)	±0,5	О(Д)	1 кОм ± 5 %	1КОJ
		±1	Ф(Р)	12,4 кОм (М) ± 1 %	12K4F
10 ⁶	М(М)	±2	С(Л)	10 кОм ± 5 %	10KJ
		±5	J(Н)	100 кОм ± 5 %	M10J
10 ⁹	СНГ	±10	К(С)	2,2 МОм4 ± 10 %	2M2K
		±20	М(В)	6,8 ГОм ± 20 %	6G8M
10 ¹²	Т(Т)	±30	Н(Ф)	1 ТОм ± 20 %	1ТОM

*В скобках указано старое обозначение.

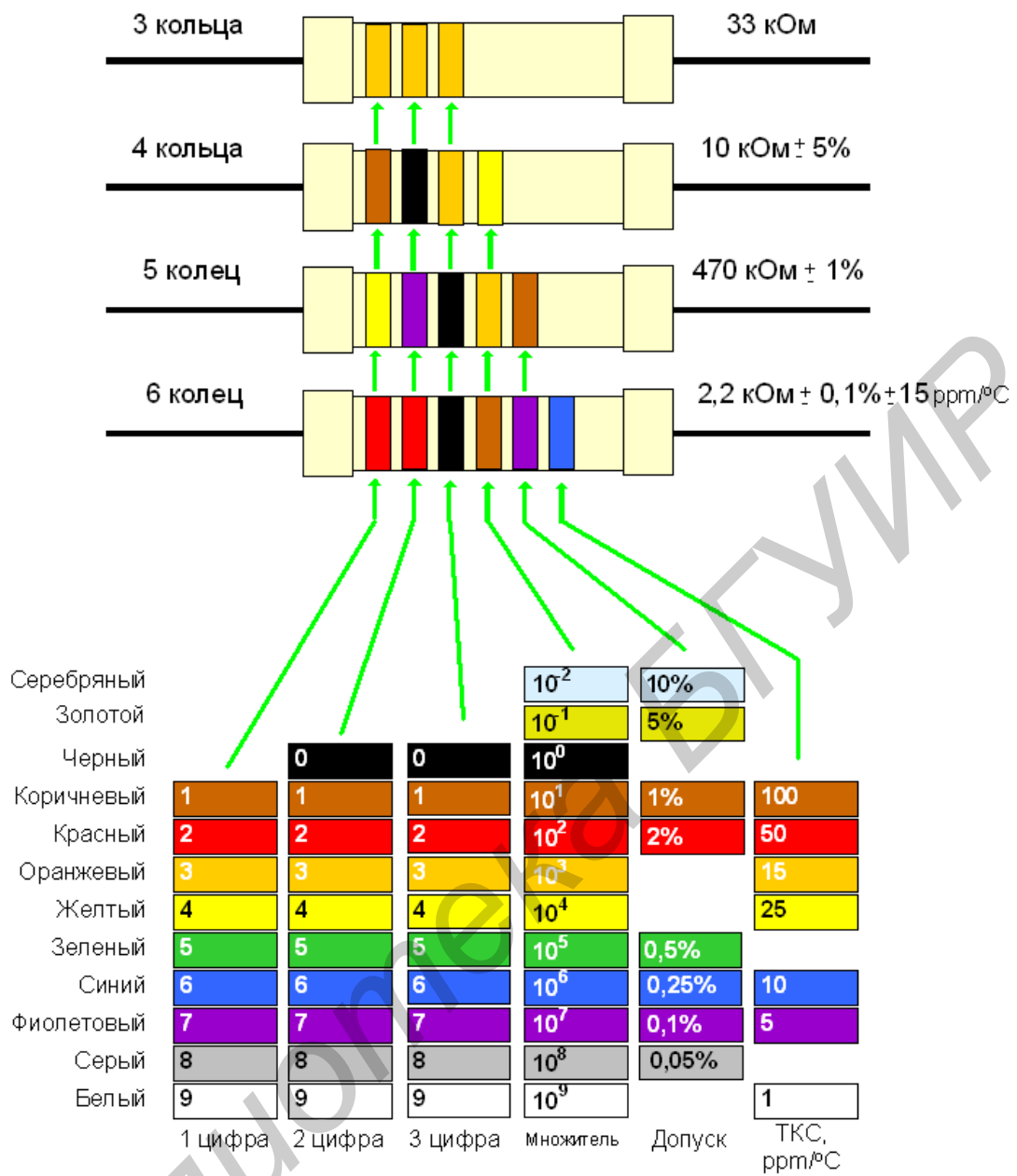


Рис. 7.1. Схема цветовой кодировки резисторов

Резистивный делитель напряжения. Схема резистивного делителя напряжения приведена на рис. 7.2.

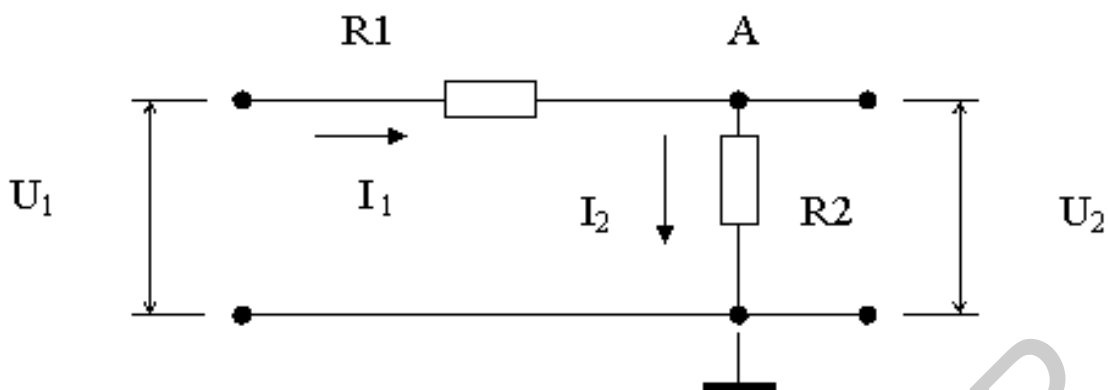


Рис. 7.2. Резистивный делитель напряжения

Резистивный делитель напряжения служит для изменения уровня входного напряжения U_1 в соответствии с формулой $U_2 = K U_1$, где K – коэффициент передачи делителя. Для нахождения K составим уравнение по первому закону Кирхгофа для узла А в соответствии с выбранными направлениями токов:

$$I_1 - I_2 = 0. \quad (7.1)$$

Подставим в это уравнение значения токов:

$$\frac{U_1 - U_2}{R_1} - \frac{U_2 - 0}{R_2} = 0. \quad (7.2)$$

Представим уравнение в виде суммы слагаемых:

$$\frac{U_1}{R_1} - \frac{U_2}{R_1} - \frac{U_2}{R_2} = 0. \quad (7.3)$$

Перенесем в правую часть слагаемые с коэффициентами U_2 и вынесем U_2 за скобки:

$$\frac{U_1}{R_1} = U_2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (7.4)$$

Приведем к общему знаменателю выражение в скобках:

$$\frac{U_1}{R_1} = U_2 \cdot \frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}. \quad (7.5)$$

Найдем результат в виде отношения U_2 / U_1 :

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (7.6)$$

Условное обозначение конденсаторов может быть сокращенным и полным. Сокращенное условное обозначение состоит из букв и цифр.

Полное обозначение номинальных емкостей состоит из цифрового значения номинальной емкости и обозначения единицы измерения (пФ – пикофарады, мкФ – микрофарады, нФ – нанофарады).

Кодированное обозначение номинальных емкостей состоит из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква кода из русского или латинского алфавита обозначает множитель, определяющий значение емкости и положение запятой десятичного знака.

Буквы П(р), Н(п), М(μ), Мк(м) Ф(F) обозначают множители 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-3} соответственно для значения емкости, выраженной в фарадах. Например, 2,2 пФ обозначается 2п2 (2р2), 1500 пФ – 1н5 (1п5), 0,1 мкФ – М1 (μ1), 10 мкФ – 10М (10), 1 Ф – 1Ф0 (1F0).

Допускаемые отклонения емкости (в процентах или в пикофарадах) маркируются после номинального значения цифрами или кодом.

Цветовое кодирование применяется для маркировки номинальной емкости, номинального напряжения до 63 В (табл. 7.2). Маркировку наносят в виде цветных точек или полосок.

Таблица 7.2

Цветовые коды для маркировки конденсаторов

Цветовой код	Номинальная емкость		Допускаемое отклонение емкости	Номинальное напряжение, В
	Первая и вторая цифры	Множитель		
Серый	—	—	—	3,2
Черный	10	1	±20 %	4
Коричневый	12	10	±1 %	6,3
Красный	15	10^2	±2 %	10
Оранжевый	18	10^3	±0,25 пФ	16
Желтый	22	10^4	±0,5 пФ	40
Зеленый	27	10^5	±5 %	25 или 20
Голубой	33	10^6	±1 %	32 или 30
Фиолетовый	39	10^7	-20...+50 %	50
Синий	47	10^{-2}	-20... + 80 %	
Белый	56	10^{-1}	±10 %	63
Серебряный	62	—	—	2,5
Золотой	82	—	—	1,6

В последнее время широкое применение находят конденсаторы, у которых в качестве диэлектрика используется фарфор или другая керамическая масса. Изготавливаются они на небольшие емкости – от 1 до 500 пФ. Они занимают мало места, очень удобны для монтажа и обладают хорошими электрическими качествами. Типы керамических конденсаторов приведены на рис. 7.3.

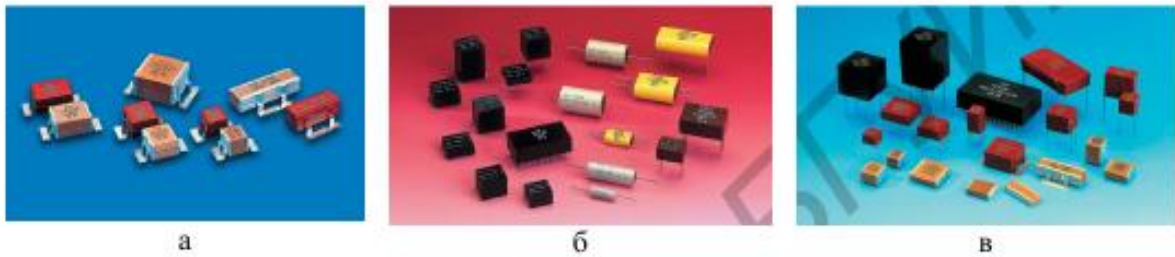


Рис. 7.3. Типы керамических конденсаторов:

а – для поверхностного монтажа; б, в – для монтажа в отверстия платы

Отличительная черта электролитических конденсаторов – их большая емкость, достигающая до нескольких десятков и даже сотен микрофард. Электролитические конденсаторы обладают полярностью. Это значит, что присоединять их в схему надо определенным образом; вывод, отмеченный значком плюс, присоединяется к плюсовому концу электрической цепи, например к плюсовому проводу выпрямителя, если конденсатор используется в фильтре выпрямителя; другой вывод присоединяется к минусовому или заземленному проводу. По величине рабочего напряжения электролитические конденсаторы могут быть разбиты на две группы: высоковольтные конденсаторы с рабочим напряжением 250...450 В и низковольтные конденсаторы с рабочим напряжением 6...40 В. Отклонение фактической емкости от номинала может достигать до 20 % в ту или другую сторону. Типы электролитических конденсаторов представлены на рис. 7.4.



Рис. 7.4. Электролитические конденсаторы для объемного и печатного монтажа

Емкости конденсаторов, необходимых для сборки по выбранной схеме, обычно указываются или на самой схеме, или в описании данного устройства. Иногда может не оказаться конденсаторов нужной емкости. В этом случае необходимо подобрать нужную величину, соединяя два или несколько конденсаторов параллельно или последовательно.

При параллельном соединении нескольких конденсаторов общая емкость соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2 + C_3. \quad (7.7)$$

При вычислениях все емкости должны быть выражены в одинаковых единицах, т. е. в пикофарадах или же в микрофарадах.

При последовательном соединении двух конденсаторов общая емкость их будет меньше емкости меньшего из двух конденсаторов. Этим свойством можно воспользоваться для получения малых емкостей. Если обозначим через C_1 емкость одного из конденсаторов, а через C_2 : емкость другого, то общая емкость их будет рассчитана по формуле

$$C = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2). \quad (7.8)$$

Пример

Имеются два конденсатора емкостью в 200 и 300 мкФ, которые соединяются последовательно. Общая емкость их равна

$$C = 200 \cdot 300 / (200 + 300) = 60\,000 / 500 = 120 \text{ мкФ}.$$

В состав радиоэлектронных блоков включаются фильтры, которые служат для выделения полезных сигналов на фоне различных помех и используются при обработке информации. Назначение электрического фильтра состоит в пропускании без затухания или с малым затуханием составляющих сложного сигнала, частоты которых лежат в заданном диапазоне частот, называемом полосой пропускания, и с большим затуханием составляющих с частотами в полосе задержки. Граничную частоту между полосой пропускания и полосой задержки называют частотой среза. Простейшая RC -цепь, содержащая только резистор (R) и конденсатор (C), представлена на рис. 7.5, а.

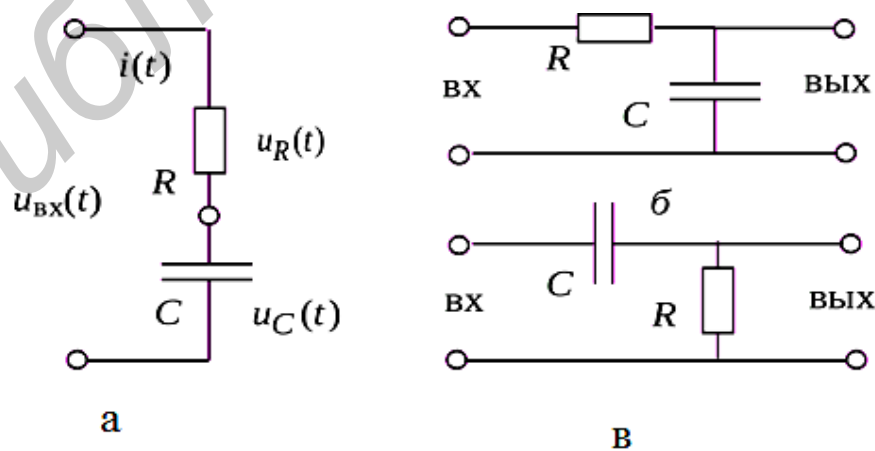


Рис. 7.5. Применение RC -цепей:
а – простейшая RC -цепь; б, в – сложные RC -цепи

В зависимости от того, с какого элемента снимается выходное напряжение, RC -цепи могут применяться как фильтры нижних частот (ФНЧ – рис. 7.5, б) или как фильтры верхних частот (ФВЧ – рис. 7.6, в), кроме того, как интегрирующие (см. рис. 7.5, б) и дифференцирующие (рис. 7.5, в) цепи.

Коэффициентом передачи называется отношение $K = U_{\text{ввых}} / U_{\text{вх}}$ (точнее это модуль или абсолютная величина коэффициента передачи).

Фильтр нижних частот. Если выходное напряжение снимать с емкости (см. рис. 7.5, б), то RC -цепь может служить в качестве ФНЧ, а если с резистора (см. рис. 7.5, в) – то в качестве ФВЧ.

На рис. 7.6 изображена принципиальная схема RC -фильтра нижних частот.

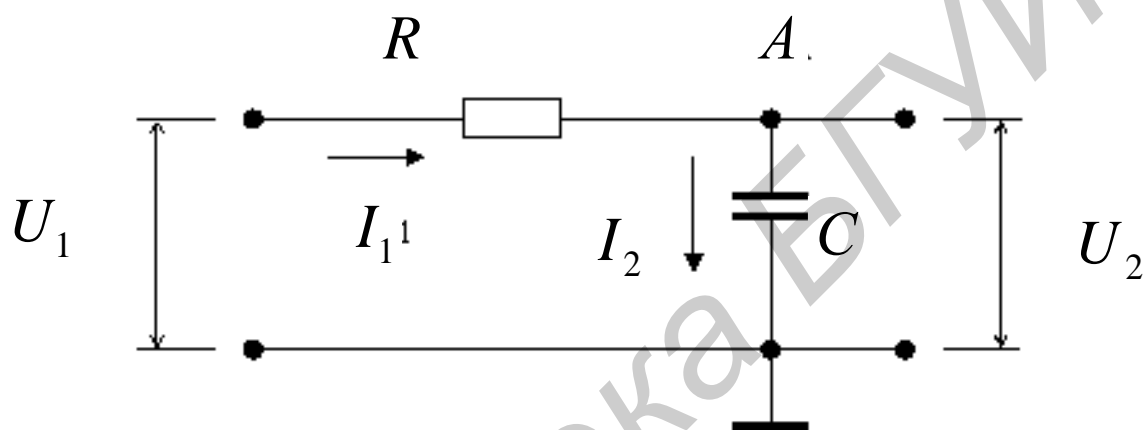


Рис. 7.6. Принципиальная схема RC -фильтра нижних частот

На рис. 7.7 и 7.8 представлены графики АЧХ и ФЧХ для данного ФНЧ. Графики нормированы относительно частоты среза. Оси частот градуированы в логарифмическом масштабе. Коэффициент передачи ФНЧ (ось ординат на АЧХ) указан в децибелах. Фазовый сдвиг на ФЧХ – в градусах. Логарифмическая характеристика построена в логарифмическом масштабе. Соседние деления логарифмической шкалы соответствуют одинаковому изменению отношения двух значений величины.

Как следует из рис. 7.7, на частотах, много больших частоты среза, коэффициент передачи обратно пропорционален частоте. При увеличении частоты в 10 раз коэффициент передачи уменьшается в 10 раз, т. е. он уменьшается на 20 дБ на декаду или на 6 дБ на октаву. Коэффициент передачи фильтра на частоте среза равен -3 дБ.

Как следует из рис. 7.8, на частотах, много больших частоты среза, фазовый сдвиг данного фильтра стремится к -90° и не превышает эту величину. Фазовый сдвиг на частоте среза равен -45° .

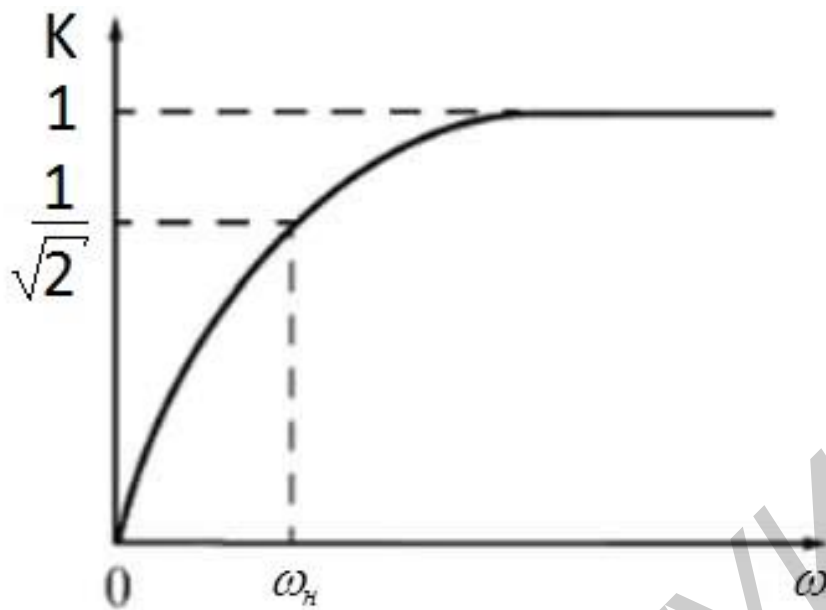


Рис. 7.7. АЧХ дифференцирующей цепи

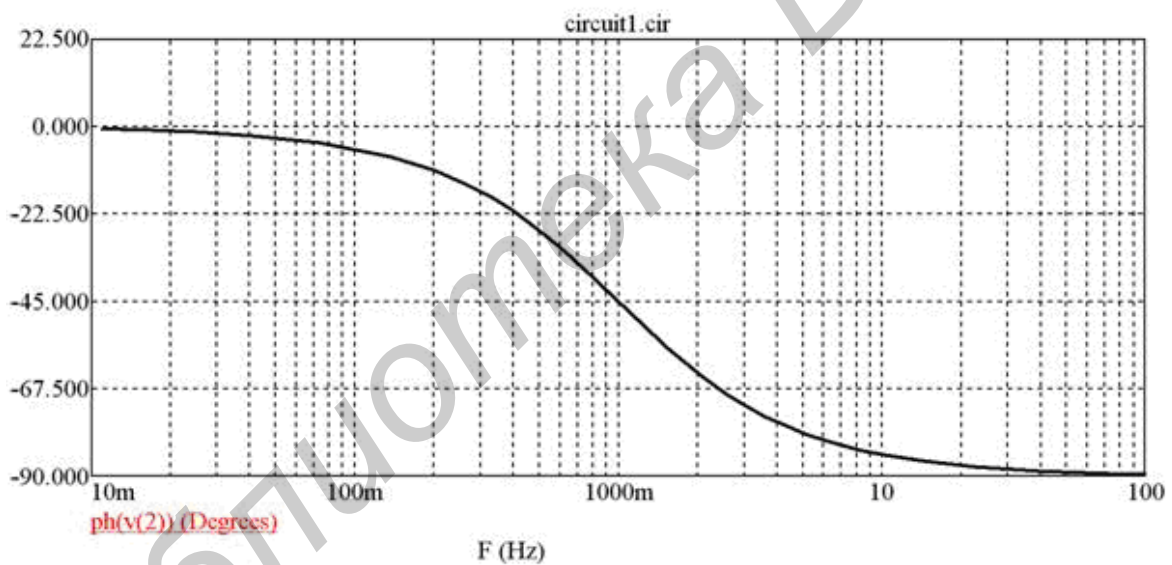


Рис. 7.8. Фазочастотная характеристика фильтра нижних частот

Фильтр верхних частот. Фильтр верхних частот – это схема, которая передает без изменений сигналы высоких частот, а на низких частотах обеспечивает затухание сигналов и опережение их по фазе относительно входных сигналов. Схема простого RC -фильтра верхних частот приведена на рис. 7.9.

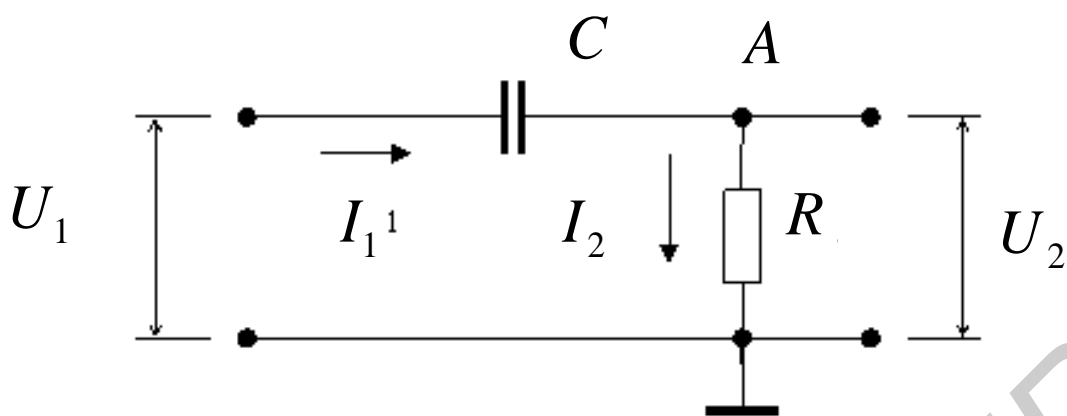


Рис. 7.9. Принципиальная схема RC-фильтра верхних частот

Амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики получим аналогично методике анализа фильтра нижних частот.

Графики АЧХ и ФЧХ RC-фильтра верхних частот приведены на рис. 7.10 и 7.11 соответственно.

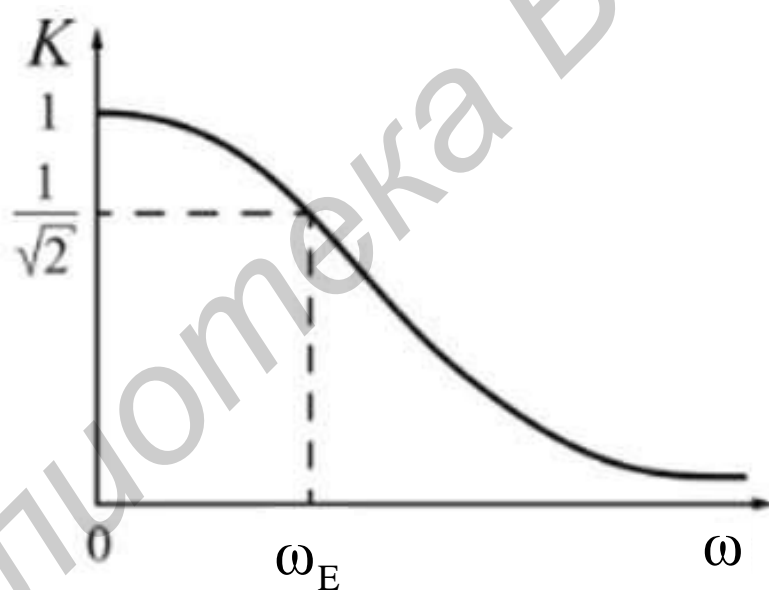


Рис. 7.10. АЧХ интегрирующей цепи

Выражение для частоты среза совпадает с соответствующим выражением для фильтра нижних частот:

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (7.9)$$

Фазовый сдвиг на этой частоте составляет $+45^\circ$.

Как следует из рис. 7.10, на частотах, много меньших частоты среза, коэффициент передачи прямо пропорционален частоте. При увеличении частоты в 10 раз коэффициент передачи увеличивается в 10 раз, т. е. он

увеличивается на 20 дБ на декаду или на 6 дБ на октаву. Коэффициент передачи фильтра на частоте среза равен -3 дБ.

Как следует из рис. 7.11, на частотах, много меньших частоты среза, фазовый сдвиг данного фильтра стремится к $+90^\circ$ и не превышает эту величину. Фазовый сдвиг на частоте среза равен $+45^\circ$.

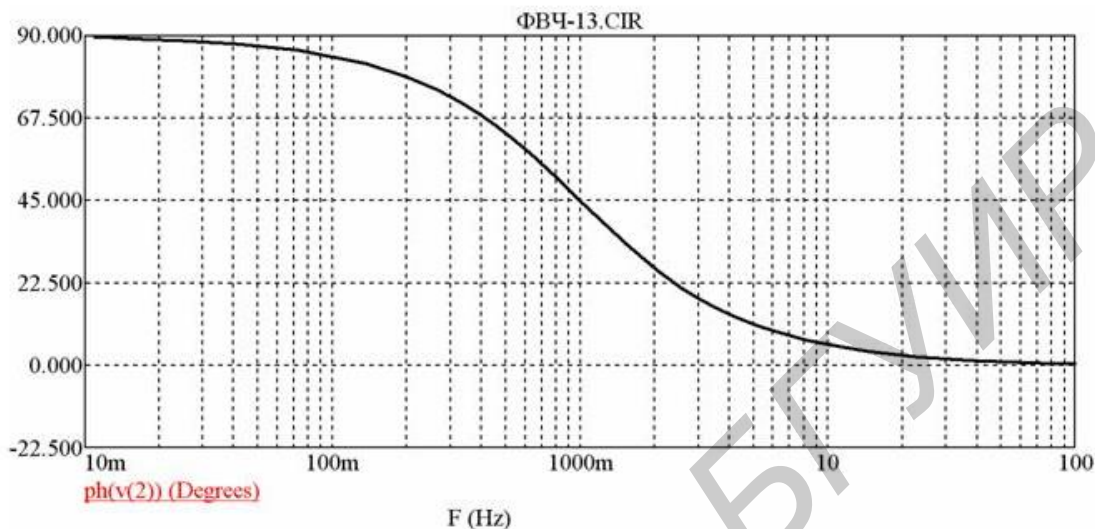


Рис. 7.11. Фазочастотная характеристика фильтра верхних частот

Задание 1

Собрать заданную схему резисторного делителя напряжения (рис. 7.12), рассчитать значения напряжений в точках A и B .

Измерить напряжение в точках A и B . Результаты занести в табл. 7.3, сравнить с расчетными данными и сделать вывод.

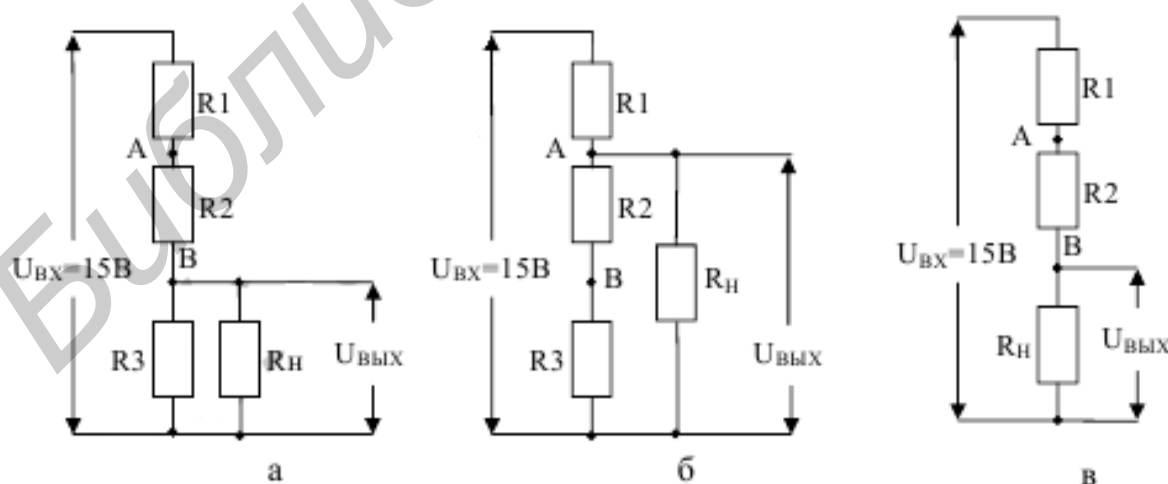


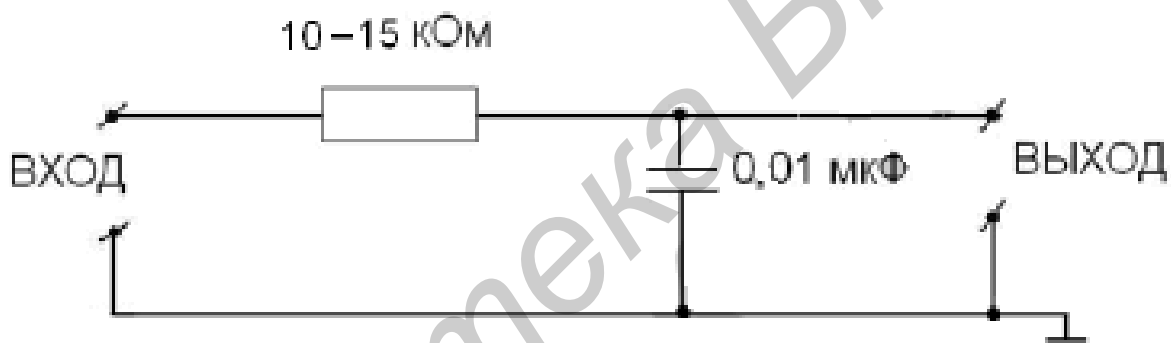
Рис. 7.12. Схемы резисторных делителей напряжения

Результаты расчетов и наблюдений

Значение	Напряжение в точке <i>A</i>	Напряжение в точке <i>B</i>
Рассчитанное		
Измеренное		

Задание 2

Собрать схему интегрирующей RC -цепи, приведенной на рис. 7.13. С генератора прямоугольных импульсов подать на вход схемы прямоугольные импульсы частотой 500 Гц, амплитудой 3–5 В и с помощью осциллографа определить их форму на выходе. Измерить постоянную времени цепи ($\tau = R \times C$) путем определения времени спада выходного сигнала от U_{\max} до $0,37 U_{\max}$. Установить, равна ли она произведению $R \cdot C$. Попробовать изменить частоту прямоугольных импульсов. Зарисовать полученные осциллограммы. Сделать выводы.

Рис. 7.13. Схема RC -цепи

Подать на вход прямоугольные импульсы частотой 100 кГц при максимальном уровне выходного сигнала 5 В. Зарисовать форму выходного сигнала. Построить амплитудно-частотную характеристику для данной цепи.

Задание 3

Собрать RC -дифференцирующую цепь (рис. 7.14). С генератора прямоугольных импульсов подать на вход схемы импульсы частотой 100 кГц и амплитудой 3–5 В. Зарисовать форму выходного сигнала.

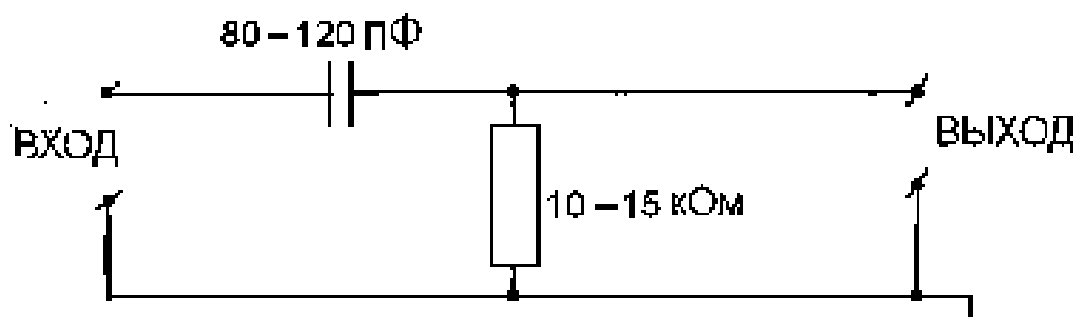


Рис. 7.14. RC-дифференцирующая цепь

Построить амплитудно-частотную характеристику для данной цепи.

7.3. Приборы и оборудование

Универсальная лабораторная установка IDL-800 Digital Lab; цифровой осциллограф БОРДО; персональный компьютер; конденсаторы; резисторы; соединительные провода.

7.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные формулы, используемые для расчетов.
3. Результаты измерений и расчетов в виде таблиц.
4. Схемы измерений.
5. Эскизы форм сигналов на выходе интегратора и дифференциатора.
6. Выводы.
7. АЧХ для дифференцирующей и интегрирующей цепей.
8. Ответы на контрольные вопросы.

7.5. Контрольные вопросы и задания

1. Амплитудная характеристика и методика ее измерения. Изобразите амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) RC-фильтра нижних частот.
2. Что происходит с формой АЧХ и граничной частотой полосы пропускания при увеличении сопротивления R ?
3. Изобразите АЧХ RC-фильтра верхних частот.
4. Как изменится граничная частота ФВЧ при увеличении сопротивления R ?
5. К какому изменению полосы пропускания ФВЧ приведет уменьшение емкости конденсатора фильтра?

ЛИТЕРАТУРА

1. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для студ. вузов по спец. «Радиотехника» / С. И. Баскаков. – 5-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2005.
2. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. пособие для вузов / И. С. Гоноровский. – 5-е изд., испр. и доп. – М. : Дрофа, 2006.
3. Стеценко, О. А. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник / О. А. Стеценко. – М. : Высш. шк., 2007.
4. Иванов, М. Т. Теоретические основы радиотехники : учеб. пособие / М. Т. Иванов, А. Б. Сергиенко, В. Н. Ушаков ; под ред. В. Н. Ушакова. – 2-е изд. – М. : Высш. шк., 2008. – 306 с.
5. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Компьютеризированный курс : учеб. пособие / В. И. Каганов. – М. : ФОРУМ ; ИНФРА-М, 2005.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Дворникова Татьяна Николаевна

***ВВЕДЕНИЕ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКУ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ***

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Е.И. Герман*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка и оригинал-макет *А. А. Луцикова*

Подписано в печать 25.02.2016. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 5,0. Тираж 100 экз. Заказ 111.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6