

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

**Факультет «Магистратура»**

В.Л. Удовикин

**ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ**

Утверждено Методическим советом ТГТУ  
в качестве методических указаний  
по проведению лабораторных работ  
для студентов магистратуры, обучающихся по направлениям  
210200 «Проектирование и технология электронных  
средств», 211000 «Конструирование и технология электронных  
средств», 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы  
связи»



Тамбов  
2013

УДК 621.396(075.8)  
ББК з884.1я73  
У 313

Рецензент:  
к.т.н., доц. И.Т. Степаненко

Удовикин В.Л.

У 313 Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: руководство к лабораторным работам / В.Л. Удовикин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 49 с.

В пособии рассмотрены краткие теоретические сведения по вопросам спектрального представления, формирования, преобразования сигналов и кодирования информации в телекоммуникационных системах и сетях, даны рекомендации по методике проведения исследований в лабораторном практикуме.

Предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению 210200 «Проектирование и технология электронных средств», 211000 «Конструирование и технология электронных средств» и 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также для студентов высших учебных заведений инфокоммуникационных специальностей.

©Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Тамбовский государственный технический  
университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»), 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие положения. ....	4
Лабораторная работа 1 Исследование представления сигналов в системах передачи информации. ....	5
Лабораторная работа 2 Исследование методов модуляции при передаче непрерывных сообщений (амплитудная модуляция). ....	15
Лабораторная работа 3 Исследование методов модуляции при передаче непрерывных сообщений (частотная модуляция). ....	23
Лабораторная работа 4 Исследование временной дискретизации аналоговых сигналов. ....	32
Лабораторная работа 5 Исследование эффективности циклического кодирования и способов обнаружения и исправления ошибок. ....	43

### Общие положения

Дисциплина «Основы построения телекоммуникационных систем и сетей» базируется на совокупности научных, технических и технологических достижений современных телекоммуникационных технологий. При изучении основ теории и общих принципов построения телекоммуникационных систем, функциональных схем устройств, станций и систем важно обеспечить усвоение студентами:

- способов формирования аналоговых и цифровых сигналов (речи и данных);
- современных методов модуляции и демодуляции сигналов;
- основ передачи и преобразования информации в системах и сетях связи с использованием современных методов кодирования сигналов.

Лабораторный практикум включает лабораторные занятия, посвященные:

- изучению основных принципов спектрального анализа сигналов и взаимосвязи между составляющими спектра и временными параметрами сигнала;
- использованию программ для моделирования электрических и электронных схем модуляции радиосигналов и дискретизации информационных сигналов;
- получению навыков использования программных пакетов компьютерного моделирования для исследования помехоустойчивости кодированных сигналов в телекоммуникационной системе.

## Лабораторная работа 1

### Исследование представления сигналов в системах передачи информации

#### 1 Цель работы

- 1.1 Практическое применение основных принципов спектрального анализа сигналов.
- 1.2 Формирование умения использовать программу для моделирования электрических и электронных схем *Multisim*.
- 1.3 Получение навыков использования программных пакетов компьютерного моделирования для спектрального анализа сигналов.

#### 2 Задание

- 2.1 Определения составляющих спектра периодического сигнала с применением преобразования Фурье.
- 2.2 Определение спектра периодического сигнала посредством возможностей, предоставляемых программой для моделирования *Multisim*.
- 2.3 Понимание связи между особенностями спектра и временными параметрами периодического сигнала.
- 2.4 Оценка эффективной ширины спектра простых сигналов.

#### 3 Краткие сведения о гармоническом анализе сигналов и программе моделирования *Multisim*

Рассмотрим вещественный периодический сигнал  $s(t)$  с периодом  $T$ .

Энергия сигнала вычисляется, на отрезке времени  $[t_1, t_2]$ , следующим образом:

$$E_s(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} s^2(t) dt .$$

В частности, энергия периодического сигнала за период  $T$  есть интеграл

$$E_{s,T} = \int_{-T/2}^{T/2} s^2(t) dt .$$

В спектральном анализе показано, что периодический сигнал с ограниченной энергией за период  $T$  может быть представлен в виде ряда Фурье

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (1.1)$$

с коэффициентами

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \cos(n\omega_1 t) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \sin(n\omega_1 t) dt \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где  $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$  - частота первой (основной) гармоники.

Колебания с номерами  $n = 2, 3, 4, 5 \dots$  называют высшими гармониками, а  $\frac{a_0}{2}$  - постоянной составляющей сигнала.

Проведя тригонометрические преобразования, можно из выражения (1.1) получить другую форму ряда Фурье:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) , \quad (1.3)$$

где  $A_n, \varphi_n$  - амплитуда и фаза  $n$ -й гармоники:

$$\begin{aligned} A_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} ; \\ \varphi_n &= -\operatorname{arctg} \frac{b_n}{a_n} . \end{aligned}$$

В соответствии с (1.3) исходный сигнал  $s$ , представленный во временной области функцией  $s(t)$ , может быть эквивалентным образом представлен в частотной области в виде его спектральной диаграммы (амплитудной и фазовой) (рисунок 1.1).

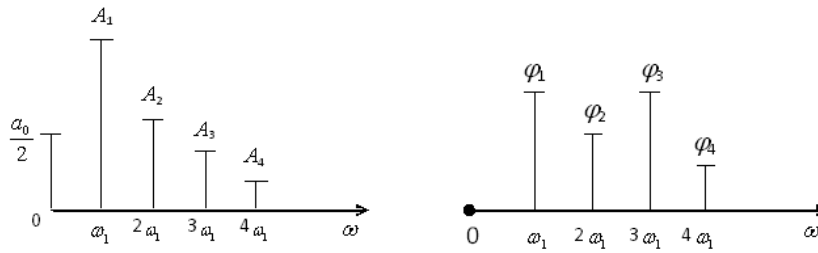


Рисунок 1.1 Амплитудная и фазовая спектральные диаграммы сигнала

Особый интерес представляет амплитудная диаграмма, которая позволяет судить о процентном содержании тех или иных гармоник в спектре периодического сигнала.

### Основные сведения о программе моделирования *Multisim*

#### Запуск программы *Multisim*.

Если программа *Multisim* правильно установлена, ее можно запустить из меню *Start* (Пуск) среды *Windows*. В зависимости от конфигурации рабочего стола и используемой версии *Windows* меню *Start* может различаться.

Вид окна программы *Multisim* и название основных его элементов приведены на рисунке 1.2.

#### Размещение компонентов.

Выбор компонентов может выполняться с помощью панели *Component* (Компонент) с помощью меню *Multisim*, вкладки *Place* и диалогового окна *Component*. Во втором случае выполняется несколько больше действий, но имеется возможность разместить любой необходимый компонент.

Для быстрого добавления источников переменного тока можно пользоваться панелью инструментов *Virtual* (Виртуальные).

Виртуальный компонент представляет собой идеальный компонент, такой, например, как диод, резистор, имеющий нестандартное значение, операционный усилитель (ОУ) и так далее. Если нажать одну из кнопок на панели инструментов, появится вложенная панель инструментов (будем называть ее «панель компонентов»). На ней можно быстро выбрать нужный компонент.

Вывод различных панелей в область их расположения обеспечивается установкой флажков перед их названиями в выпадающем меню, появ-

ляющемуся при установке стрелки курсора в область расположения панелей и щелчке правой кнопкой мышки.

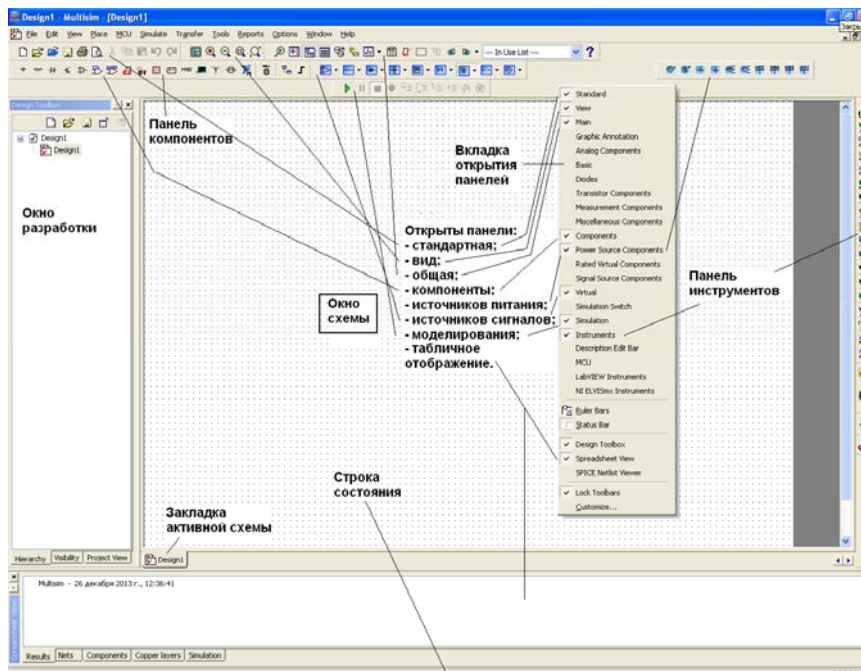


Рисунок 1.2 Вид окна программы *Multisim*

Панель компонентов содержит стандартные компоненты, а именно:

- *PowerSources* (Источники питания) - одно и трехфазные источники питания, а также источники питания постоянного тока и заземление;
- *SignalSources* (Источники сигнала) - источники напряжения и тока: источники прямоугольного сигнала, кусочного линейного сигнала и таймеры;
- *BasicParts* (Базовые компоненты) - базовые компоненты, которые включают резисторы, конденсаторы, катушки и так далее;
- *DiodesandZeners* (Диоды и стабилитроны);
- *TransistorComponents* (Транзисторные компоненты) - биполярные транзисторы *BJT*, мощные полевые транзисторы *MOSFET*, арсенид галлиевые транзисторы *GaAsFET* и полевые транзисторы *JFET*;



- *AnalogComponents* (Аналоговые компоненты) - операционные усилители (ОУ) и компараторы;
- *MiscellaneousComponents* (Прочие компоненты) - аналоговые переключатели, предохранители, 7-сегментные дисплеи, двигатели, таймер 555-й серии и так далее;
- *RatedComponents* (Компоненты с ограничениями) - компоненты, которые имеют физические ограничения и могут выйти из строя при их превышении. Например, резисторы с ограничением по мощности или транзисторы с ограничением по коллекторному току. Если во время моделирования будет превышено предельное значение, компонент в схеме будет показан как вышедший из строя;
- *3D Components* (Трехмерные компоненты) - отображаются с использованием элементов трехмерной графики;
- *MeasurementsComponents* (Измерительные компоненты) - устройства для измерения напряжения и тока, а также пробники логического уровня.

#### Подключение компонентов.

Для соединения компонентов необходимо подвести курсор мыши к контакту компонента. При приближении к контакту курсор мыши будет заменен символом в виде перекрестья. Далее производится щелчок ЛЕВОЙ кнопкой мыши и перемещение курсора. Вы заметите, что при его перемещении за перекрестьем тянется линия. Если нет необходимости подводить провод к выбранному полюсу, нажмите клавишу *ESC*, линия исчезнет.

## **4 Содержание работы и порядок выполнения работы**

### **4.1 Блок-схема экспериментальной установки для исследования спектра периодических сигналов**

Для проведения спектрального анализа в пакете *Multisim* реализуется схема, представленная на рисунке 1.3.

Для настройки генератора сигналов необходимо произвести двойной щелчок ЛЕВОЙ кнопкой мыши по соответствующему функциональному блоку. Появляется диалоговое окно параметров функционального блока генераторов (рисунок 1.4).

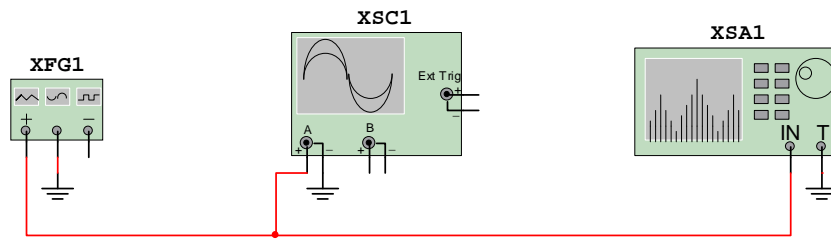


Рисунок 1.3 Схема проведения спектрального анализа  
*XFG1* - генератор сигналов, *XSA1*– анализатор спектра,  
*XSC1* – осциллограф

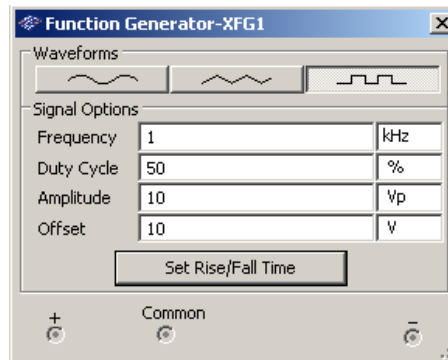


Рисунок 1.4 Вид функционального блока генераторов  
*Waveforms* – форма сигнала, *Frequency* - частота,  
*DutyCycle* – длительность импульсов (в % от периода сигнала),  
*Amplitude* – амплитуда сигнала,  
*Offset* – постоянная составляющая сигнала ( $a_0$ )

## 4.2 Исследование спектра периодических сигналов

### 4.2.1 Гармонический сигнал

Настройте генератор сигналов для формирования гармонического сигнала с параметрами:

амплитуда  $U = \underline{10}$  В; частота  $f = \underline{1}$  кГц; смещение  $a_0 = \underline{0}$  В.

Установите элементы регулировки анализатора спектра в положении:

Полоса : 10 кГц.

Начало : 0 кГц.

Граница : 10 кГц.

Чувствительность : 2 В/дел.

Число точек разложения : 8192.

Разрешение : 20 Гц.

Зафиксируйте форму и спектр сигнала. Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы о параметрах сигнала и его спектра.

#### 4.2.2 Треугольный сигнал

Настройте генератор сигналов для формирования треугольного сигнала с параметрами:

амплитуда  $U = \underline{10}$  В; частота  $f = \underline{1}$  кГц; длительность : 50 %; смещение  $a_0 = \underline{0}$ .

Оставьте элементы регулировки анализатора спектра в том же положении, что и в п. 4.2.1.

Зафиксируйте форму и спектр сигнала.

Теоретический расчет по формулам (1.1) даёт для треугольного сигнала с нулевой постоянной составляющей следующие значения коэффициентов:

$a_0 = 0$ ;  $a_n = 8U/n^2\pi^2$  для нечётных  $n$  и нулю для чётных;  $b_n = 0$ .

Сопоставьте расчётные значения амплитуд гармоник  $a_n$  с результатами компьютерного моделирования.

№ гармоники $n$	0	1	2	3	4
Расчёт					
Эксперимент					

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы о параметрах сигнала и его спектра.

#### 4.2.3 Меандр

Настройте генератор сигналов для формирования меандра:

амплитуда  $U = \underline{10}$  В; частота  $f = \underline{1}$  кГц; длительность = 50 %; смещение  $a_0 = \underline{0}$ .

Оставьте элементы регулировки анализатора спектра в том же положении, что и в п. 4.2.1.

Зафиксируйте форму и спектр сигнала.

Теоретический расчет по формулам (1.1) даёт для меандра с нулевой постоянной составляющей следующие значения коэффициентов:

$a_0=0$ ;  $a_n=4U/n\pi$  для нечётных  $n$  и нулю для чётных;  $b_n=0$ .

Сопоставьте расчётные значения амплитуд гармоник  $a_n$  с результатами компьютерного моделирования.

№ гармоники $n$	0	1	2	3	4
Расчёт					
Эксперимент					

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы о параметрах сигнала и его спектра.

#### 4.2.4 Последовательность прямоугольных видеоимпульсов

Для сигнала, представляющего из себя последовательность прямоугольных импульсов с длительностью  $\tau$  и периодом  $T$  (рисунок 1.5).

преобразование Фурье даёт следующие коэффициенты:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} A dt = A \frac{\tau}{T} = \frac{A}{q},$$

где  $q = T/\tau$  - скважность импульсов;  
 $b_n = 0$ ;

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} A \cos(n\omega_1 t) dt = \frac{2A}{n\pi} \sin \frac{n\omega_1 \tau}{2} = 2A \frac{\tau}{T} \cdot \frac{\sin(n\pi \frac{\tau}{T})}{n\pi \frac{\tau}{T}}.$$

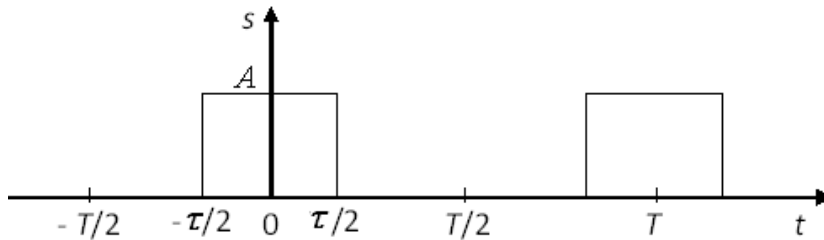


Рисунок 1.5 Последовательность прямоугольных импульсов

Окончательно Фурье-представление такого сигнала имеет вид:

$$s(t) = A \frac{\tau}{T} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi \frac{\tau}{T})}{n\pi \frac{\tau}{T}} \cdot \cos(n\omega t) \right]$$

Амплитудный спектр этого сигнала имеет характер функции  $(\sin x/x)$  (рисунок 1.6).

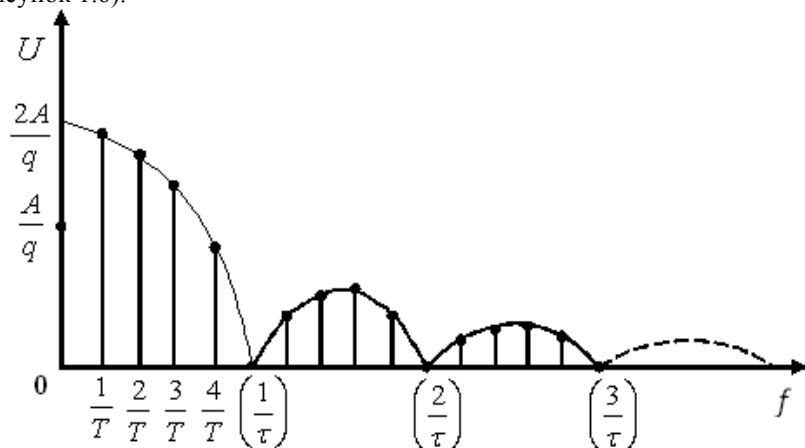


Рисунок 1.6 Амплитудный спектр последовательности прямоугольных импульсов

Максимумы лепестков этого спектра находятся в пропорции  $1, 2/3\pi, 2/5\pi, 2/7\pi, 2/9\pi$  и т.д. Таким образом, максимум 2-го лепестка составляет 21% от первого, максимум 3-го лепестка – 13%, 4-го - 9% и т.д.

Настройте генератор сигналов для формирования последовательности прямоугольных импульсов:

амплитуда  $U = \underline{10}$  В; частота  $f = \underline{1}$  кГц; длительность :  $\underline{10}$  %; смещение  $a_0 = \underline{10}$  В.

Это соответствует импульсам с  $A = 20$  В и скважностью  $q = 10$ .

Установите элементы регулировки анализатора спектра в положение:

Полоса :  $\underline{40}$  кГц.

Начало :  $\underline{0}$  кГц.

Граница :  $\underline{40}$  кГц.

Чувствительность :  $\underline{1}$  В/дел.

Число точек разложения : 8192.

Разрешение : 20 Гц.

Зафиксируйте форму и спектр сигнала.

Рассчитайте значения максимумов первых трёх лепестков и сопоставьте их с результатами компьютерного моделирования.

№ лепестка	1	2	3
Расчёт			
Эксперимент			

Измените длительность импульсов: длительность 20 %. Зафиксируйте форму и спектр сигнала.

Проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы о параметрах сигнала и его спектра. Поясните, как изменяется спектр сигнала при изменении длительности импульсов.

Сделайте общие выводы о методах описания и характеристиках сигналов.

### 5 Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- 1) результаты расчетов и моделирования по пунктам 4.2.1 и 4.2.4 задания, их анализ и выводы;
- 2) краткое описание используемых для моделирования программных и технических средств;

При оформлении отчёта по лабораторной работе использовать возможности графического интерфейса пакета *Multisim*.

### Литература

1. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 2000. - 462 с.
2. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Радио и связь, 1986. - 512 с.

## Лабораторная работа 2

### Исследование методов модуляции при передаче непрерывных сообщений (амплитудная модуляция)

#### 1 Цель работы

Изучение методов моделирования электронных устройств с помощью программы *Multisim*, исследование метода амплитудной модуляции (АМ) при передаче непрерывных сообщений, получение осциллограмм и спектрограмм АМ сигнала с различными коэффициентами и частотами модуляции.

#### 2 Задание

2.1 Изучить в процессе самостоятельной подготовки основные теоретические положения по амплитудной модуляции (стр. 109-112 [1], стр. 33-39 [2], стр. 92-100 [3] и стр. 72-81, 255-257 [4]).

2.2 Выполнить предварительные расчеты:

- построить временные зависимости АМ сигнала с несущей частотой  $f_0 = f_c = 100$  кГц при частоте модуляции  $F_m = 20$  кГц и различных коэффициентах модуляции  $m = 0,3; 0,6; 1; 1,2$  на интервале наблюдения  $t_n = [0, 150]$  мкс;

- построить спектры несущего колебания и АМ сигнала при различных коэффициентах модуляции.

2.3 Провести моделирование процесса АМ и анализ полученных результатов.

#### 3 Краткие сведения об амплитудной модуляции

На рисунке 2.1 показана упрощенная схема радиопередающего устройства с АМ сигналом. Звуковое сообщение преобразуется микрофоном в электрический низкочастотный сигнал (модулирующее сообщение), которое поступает в амплитудный модулятор. С другой стороны в модулятор поступает высокочастотный сигнал (несущее колебание). На выходе модулятора образуется АМ сигнал с симметричной огибающей и высокочастотным заполнением. Огибающая АМ сигнала изменяется по закону, совпадающему с изменениями низкочастотного модулирующего сообщения. Частота и начальная фаза АМ сигнала остаются неизменными.

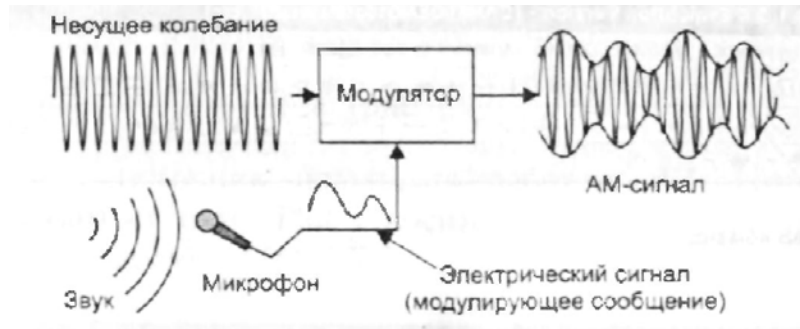


Рисунок 2.1 Радиопередающее устройство с АМ сигналом

На рисунке 2.2 показана структурная схема экспериментальной установки для получения АМ сигнала, которая реализуется в системе моделирования *Multisim*.

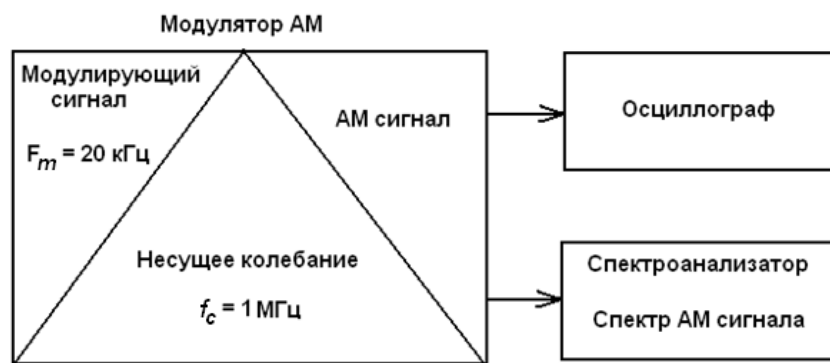


Рисунок 2.2 Структурная схема экспериментальной установки

Для описания АМ сигнала используется следующая аналитическая запись:

$$u_{\text{АМ}}(t) = U_0 [1 + m \cos \Omega t] \sin \omega_0 t, \quad (2.1)$$

где  $U_0 = 5 \text{ В}$  - постоянный коэффициент, определяющий амплитуду несущего колебания в отсутствие модуляции;  $m = 0,2$  (0,5; 1; 1,2) - коэффици-



ент амплитудной модуляции;  $\Omega = 2\pi F_m$  - модулирующая частота ( $F_m = 20$  кГц);  $\omega_0 = 2\pi f_0$  - частота несущего колебания ( $f_0 = f_c = 1$  МГц).

В программе *Multisim* принята следующая форма записи АМ сигнала:

$$V_{OUT} = v_C * \sin(2\pi * f_c * TIME) * (1 + m * \sin(2\pi * F_m * TIME)),$$


где  $v_C$  - амплитуда несущего колебания без модуляции, В;  $f_c$  - частота несущего колебания, Гц;  $m$  - коэффициент модуляции;  $F_m$  - частота модулирующего колебания, Гц.

#### 4 Порядок выполнения работы

##### 4.1 Состав экспериментальной установки для исследования спектров амплитудно-модулированных сигналов

Для проведения временного и спектрального анализа АМ сигналов в пакете *Multisim* реализуется схема, представленная на рисунке 1.3 в лабораторной работе 1 «Исследование представления сигналов в системах передачи информации», с заменой в ней генератора сигналов *XFG1* на амплитудный модулятор. Выбор и ввод в схему амплитудного модулятора можно произвести следующими способами выбора компонентов (рисунок 2.3):

1 С помощью пункта меню *Place* (Панели) (или щелчком правой кнопки мышки в рабочем поле) выбором: в выпадающем меню пункта *Component* (Компоненты) → во вкладке *SelectComponent* (Выбор компонента) в подменю *Group* (Группы) - группы *Source* (Источники), в подменю *Family* (Семейство) - *Signal\_Voltage\_Source* (Источники напряжения сигнала) и в подменю *Component - AM\_Voltage* (АМ напряжение).

2 С использованием позиции *Place\_Source*  панели компонентов (*Component*).

3 С использованием панели *Virtual* (Виртуальные), позиции источников сигналов *Show\_Signal\_Source\_Family* выбрать *Place\_AM\_Source*



панели (*SignalSourceComponents*).

Вывод различных панелей в область их расположения обеспечивается установкой флажков перед их названиями в выпадающем меню, появляющемся при установке стрелки курсора в область расположения панелей и щелчке правой кнопкой мышки.

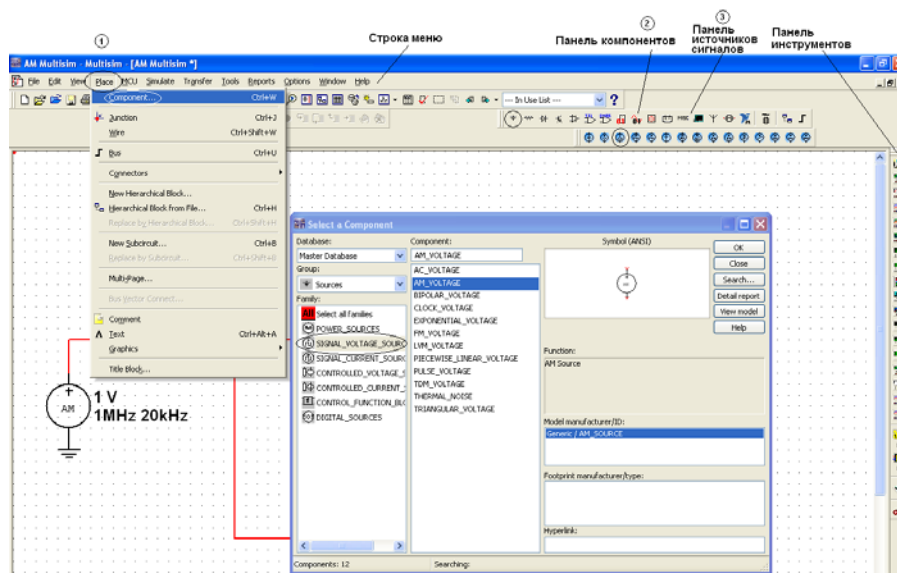


Рисунок 2.3 Выбор и ввод в схему амплитудного модулятора

## 4.2 Сборка и экспериментальные исследования схемы амплитудного модулятора

### 4.2.1 Составление экспериментальной установки

Собрать экспериментальную установку для исследования АМ сигналов, изображенную на рисунке 2.4.

При выборе щелчком ЛЕВОЙ кнопкой мыши соответствующего компонента схемы из панели курсор примет форму графического изображения выбранного компонента. Поместите его в рабочее окно, зафиксируйте это положение, щелкнув левой клавишей мыши.

Для соединения компонентов необходимо подвести курсор мыши к контакту компонента. При приближении к контакту курсор мыши будет заменен символом в виде перекрестья. Далее производится щелчок ЛЕВОЙ кнопкой мыши и перемещение курсора. Вы заметите, что при его перемещении за перекрестьем тянется линия. Если нет необходимости подводить провод к выбранному полюсу, нажмите клавишу *ESC*, линия исчезнет.

#### 4.2.2 Ввод параметров АМ напряжения

Для настройки амплитудного модулятора необходимо произвести двойной щелчок ЛЕВОЙ кнопкой мыши по функциональному блоку V1. Появляется диалоговое окно **AM\_VOLTAGE** параметров амплитудного модулятора (рисунок 2.5).

В появившемся окне панели **AM\_VOLTAGE** во вкладке **Value (Величина)** ввести параметры АМ напряжения:

амплитуда несущего колебания (**CarrierAmplitude**)  
 $v_C = 5 \text{ V}$  ( $U_0 = 5 \text{ B}$ );

частота несущего колебания (**CarrierFrequency**)  $f_c = 1 \text{ MHz}$  ( $f_0 = 1 \text{ МГц}$ );

коэффициент модуляции (**ModulationIndex**)  $m = 0,3$ ;

частота модуляции (**Intelligence Frequency**)  $F_M = 20 \text{ kHz}$  ( $F_M = 20 \text{ кГц}$ ) колебания, имитирующего низкочастотный модулирующий сигнал.

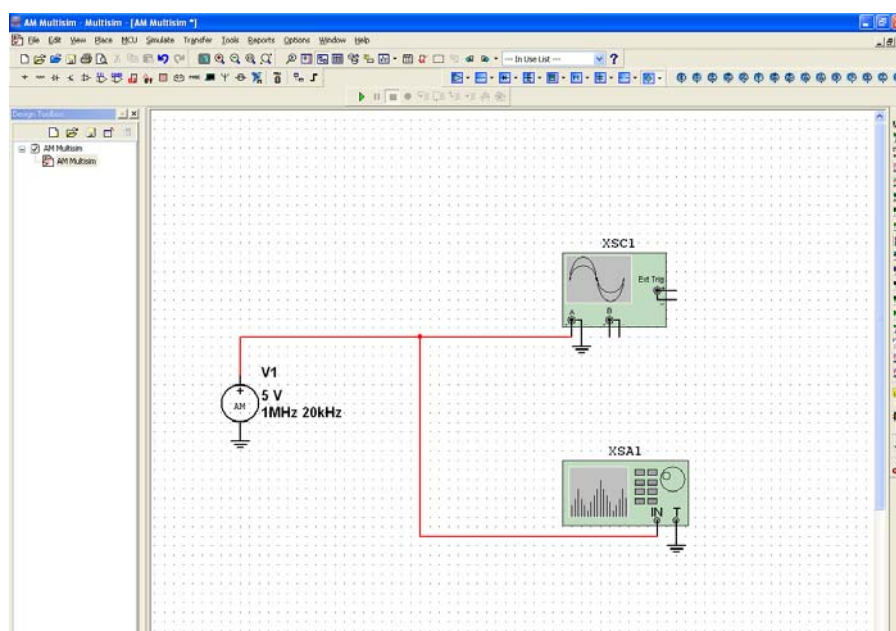


Рисунок 2.4 Схема экспериментальной установки  
 V1 - амплитудный модулятор, XSA1 – анализатор спектра,  
 XSC1 – осциллограф

### 4.3 Исследование осциллограмм и спектров АМ сигнала при различных параметрах

Установите элементы регулировки анализатора спектра в положения (рисунок 2.6):

Диапазон частот (**Span**): 80 kHz.

Начало (**Start**): 960 kHz.

Граница (**End**): 1,04 MHz.

Чувствительность (**Range**): 1 V/Div (В/дел).

Разрешение (**Resolution freq**): 200 Hz.

Вкладка **Set**:

число точек разложения БПФ (**FFTpoints**): 8192.

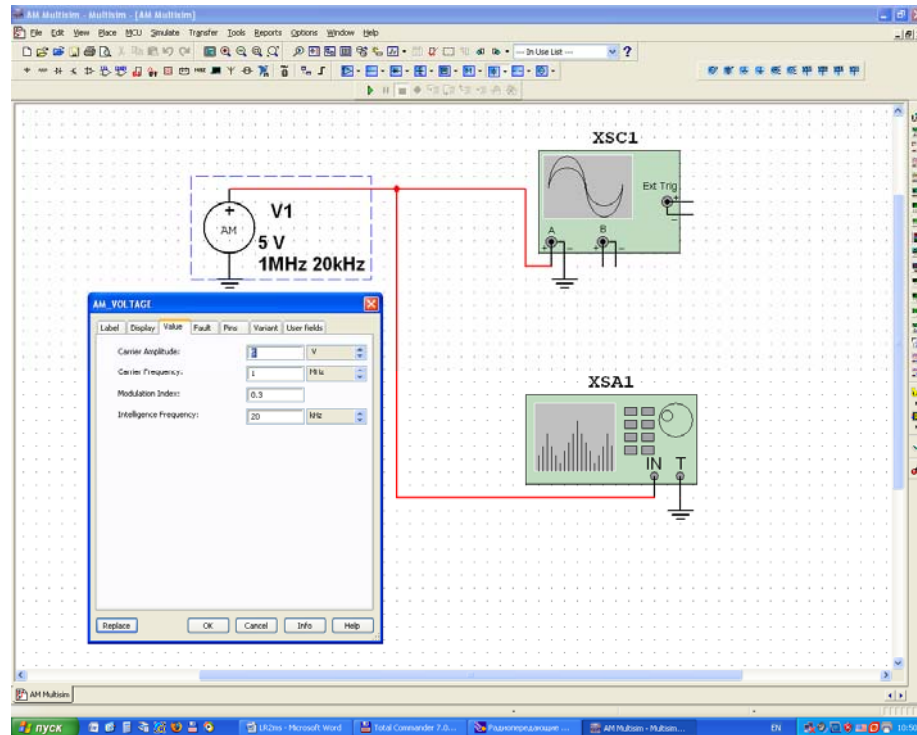


Рисунок 2.5 Ввод параметров АМ напряжения

Зафиксируйте форму и спектр сигнала в соответствующем разделе отчета. Сделайте вывод о форме полученного АМ сигнала и его спектре.

Повторите машинный эксперимент при других коэффициентах и частотах модуляции ( $m = 0,6; 1; 1,2$  и  $m = 0,3; F_M = 40$  кГц). Полученные графики занесите в соответствующий раздел отчета.

Сделайте вывод о форме АМ сигнала и его спектре. Сравните полученные АМ сигналы с аналогичными кривыми, полученными в предва- рительном расчете.

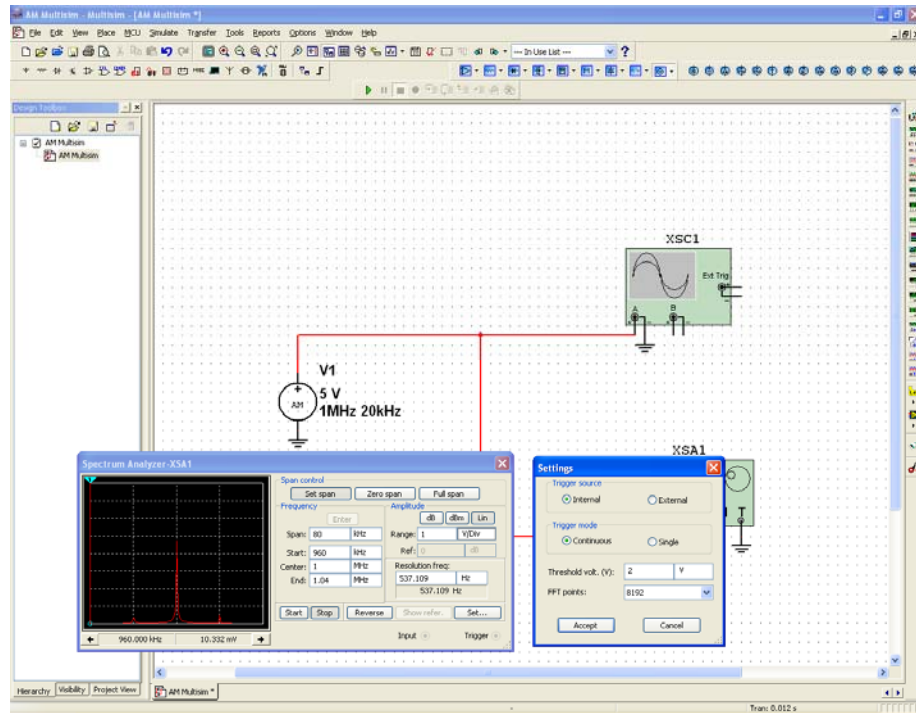


Рисунок 2.6 Ввод параметров анализатора спектра

## 5 Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- 1) название работы, задание и исходные данные для выполнения работы;

2) результаты предварительных расчетов (формулы, таблицы, графики, спектры);

3) результаты машинного эксперимента; осциллограммы и спектры исследуемых процессов;

4) анализ полученных результатов и выводы по работе.

Для защиты лабораторной работы должен быть представлен отчет, оформленный с соблюдением требований ЕСКД в рукописном или печатном виде.

### **6 Вопросы для самопроверки**

1. Каков спектральный состав АМ сигнала?

2. Как расположены спектральные компоненты АМ сигнала относительно несущей частоты.

3. Покажите, что процесс модуляции связан с переносом спектра сигнала из области низких в область высоких частот?

4. Поясните связь при амплитудной модуляции огибающей сигнала с мгновенным значением низкочастотного модулирующего колебания?

5. Каков принцип работы радиопередатчика с АМ?

### **Литература**

3. Каганов, В.И. Основы радиоэлектроники и связи: Уч. пособие для вузов/ В.И. Каганов, В.К. Битюков. - М.: Горячая линия - Телеком, 2007. - 542 с.

4. Гаранин, М.В. Системы и сети передачи информации. / М.В. Гаранин, В.И. Журавлев, С.В. Кунегин. – М.: Радио и связь, 2001.-336 с.

5. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 2000. - 462 с.

6. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Радио и связь, 1986. - 512 с.

### Лабораторная работа 3

#### Исследование методов модуляции при передаче непрерывных сообщений (частотная модуляция)

##### 1 Цель работы

Изучение методов моделирования электронных устройств с помощью программы *Multisim*, исследование метода частотной модуляции (ЧМ) при передаче непрерывных сообщений, получение осциллограмм ЧМ сигнала с различными индексами модуляции.

##### 2 Задание

2.1 Изучить в процессе самостоятельной подготовки основные теоретические положения по частотной модуляции (ЧМ) (стр. 114 - 125 [1], стр. 103-114 [2] и стр. 81 - 89 [3]).

2.2 Выполнить предварительные расчеты:

- построить временные зависимости ЧМ сигнала при различных индексах частотной модуляции  $m_{\text{ЧМ}} = 0,5; 5,0; 10$  на интервале наблюдения  $t_n = [0, 40]$  мкс;

- описать влияние индекса частотной модуляции на спектральный состав однотонального ЧМ сигнала и определить ширину спектра ЧМ сигнала при разных индексах модуляции (для значений  $m_{\text{ЧМ}}$ , использованных при расчете временных зависимостей).

2.3 Провести моделирования процесса ЧМ и анализ полученных результатов.

##### 3 Краткие сведения о частотной модуляции

На рисунке 3.1 показана упрощенная схема радиопередающего устройства с ЧМ. Звуковое сообщение, несущее некоторую информацию, преобразуется микрофоном в электрический низкочастотный сигнал (модулирующее сообщение), которое поступает в частотный модулятор. С другой стороны в модулятор поступает высокочастотный сигнал (несущее колебание). На выходе частотного модулятора образуется ЧМ сигнал с постоянной амплитудой и с изменяющейся мгновенной частотой.

Упрощенно можно считать, что частотный модулятор это генератор, частота колебаний которого управляется напряжением (ГУН), поступающим на его вход (рисунок 3.2).

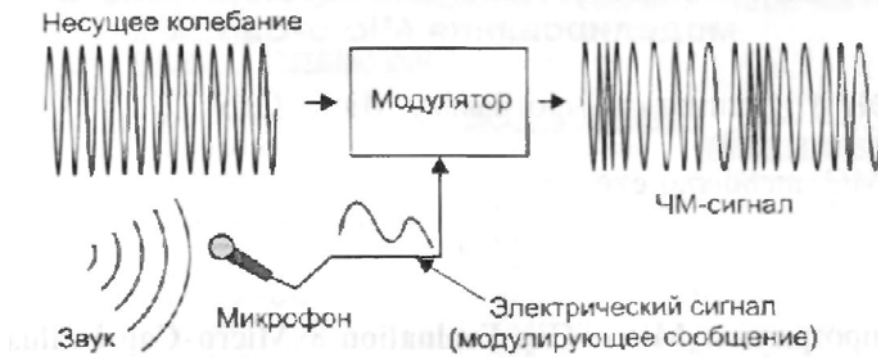


Рисунок 3.1 Радиопередающее устройство с ЧМ

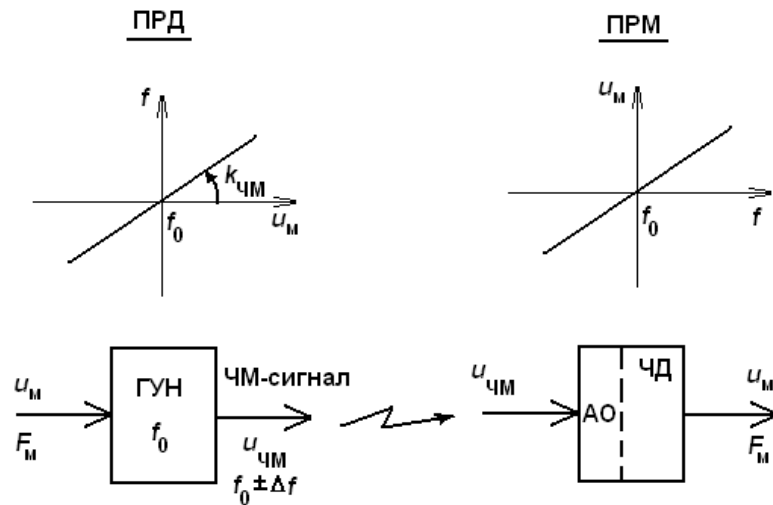


Рисунок 3.2 Принцип формирования и демодуляции ЧМ сигнала

В случае однотонального ЧМ сигнала мгновенную частоту можно записать в виде

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega_m \cos(\Omega_M t + \varphi_0), \quad (3.1)$$

где  $\omega(t)$  - мгновенная частота ЧМ сигнала;  $\omega_0$  - несущая частота ЧМ сигнала;  $\Delta\omega_m$  - девиация (максимальное отклонение от  $\omega_0$ ) частоты ЧМ сиг-



нала;  $\varphi_0$  - начальная фаза;  $\Omega_M = 2\pi F_M$  - частота модулирующего низкочастотного сигнала.

Аналитическая форма записи ЧМ сигнала:

$$u(t) = U_0 \cos[\omega_0 t + m_{\text{ЧМ}} \sin \Omega_M t + \varphi_0], \quad (3.2)$$

где  $m_{\text{ЧМ}} = k_{\text{ЧМ}} U_M = \Delta \omega_m / \Omega_M$  - индекс однотоновой частотной модуляции;  $U_0$  - амплитуда ЧМ сигнала.

В программе *Multisim* принята следующая форма записи ЧМ сигнала:

$$V_{OUT} = v_a * \sin(2\pi * f_c * TIME + m * \sin(2\pi * f_m * TIME)),$$


где  $v_c$  - амплитуда несущего колебания без модуляции, В;  $f_c$  - частота несущего колебания, Гц;  $m$  - индекс модуляции;  $f_m$  - частота модулирующего колебания, Гц.

## 4 Порядок выполнения работы

### 4.1 Состав экспериментальной установки для исследования спектров ЧМ сигналов

Для проведения временного и спектрального анализа ЧМ сигналов в пакете *Multisim* реализуется схема, представленная на рисунке 1.3 в лабораторной работе 1 «Исследование представления сигналов в системах передачи информации», с заменой в ней генератора сигналов *XFG1* на частотный модулятор. Выбор и ввод в схему частотного модулятора можно произвести следующими способами выбора компонентов (рисунок 3.3):

4 С помощью пункта меню *Place* (Панели) выбором: в выпадающем меню пункта *Component* (Компоненты) → во вкладке *SelectComponent* (Выбор компонента) в подменю *Group* (Группы) - группы *SIGNAL\_VOLTAGE\_SOURCE* (Источники напряжения сигнала) и в подменю *Component - AM\_VOLTAGE*.

5 С использованием позиции *Place\_Source*  панели компонентов (*Component*).

6 С использованием позиции *Place\_AM\_Source*  панели источников сигналов (*SignalSourceComponents*).

Вывод различных панелей в область их расположения обеспечивается установкой флажков перед их названиями в выпадающем меню, появ-

лящемся при установке стрелки курсора в область расположения панели и щелчке правой кнопкой мышки.

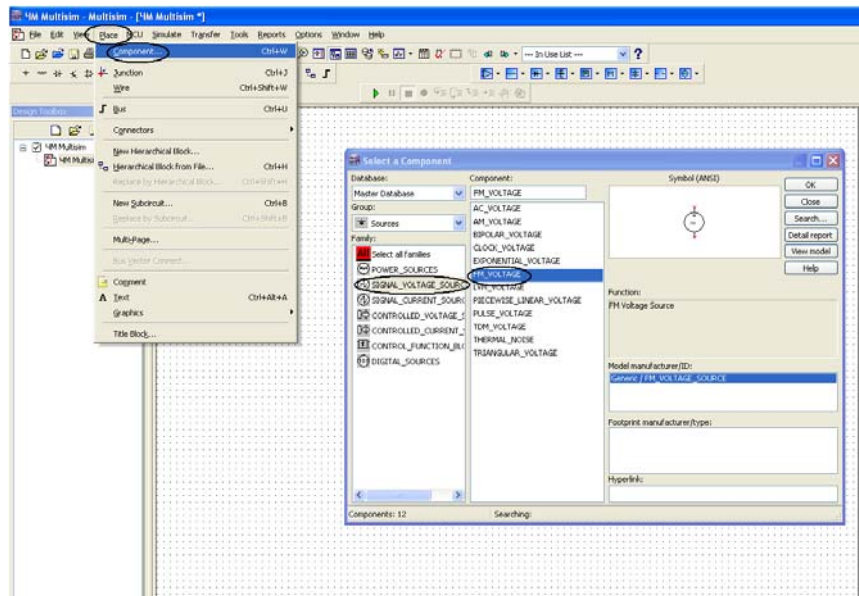


Рисунок 3.3 Выбор и ввод в схему частотного модулятора

## 4.2 Сборка и экспериментальные исследования схемы частотного модулятора

### 4.2.1 Составление экспериментальной установки

Собрать экспериментальную установку для исследования ЧМ сигналов, изображенную на рисунке 3.4. При выборе щелчком ЛЕВОЙ кнопкой мыши соответствующего компонента схемы из панели курсор примет форму графического изображения выбранного компонента. Поместите его в рабочее окно, зафиксируйте это положение, щелкнув левой клавишей мыши.

Для соединения компонентов необходимо подвести курсор мыши к контакту компонента. При приближении к контакту курсор мыши будет заменен символом в виде перекрестья. Далее производится щелчок ЛЕВОЙ кнопкой мыши и перемещение курсора. Вы заметите, что при его перемещении за перекрестьем тянется линия. Если нет необходимости

подводить провод к выбранному полюсу, нажмите клавишу *ESC*, линия исчезнет.

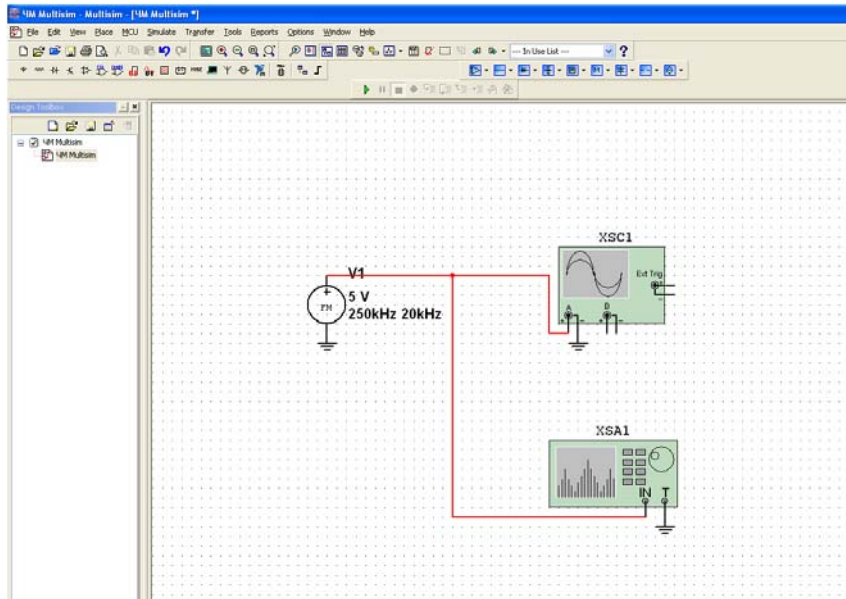


Рисунок 3.4 Схема экспериментальной установки  
V1 - частотный модулятор, XSA1 – анализатор спектра,  
XSC1 – осциллограф

#### 4.2.2 Ввод параметров ЧМ напряжения

Для настройки частотного модулятора необходимо произвести двойной щелчок ЛЕВОЙ кнопкой мыши по функциональному блоку V1. Появляется диалоговое окно **FM\_VOLTAGE** параметров частотного модулятора (рисунок 3.5).

В появившемся окне панели **FM\_VOLTAGE** во вкладке **Value (Величина)** ввести параметры ЧМ напряжения:

амплитуда несущего колебания (**CarrierAmplitude**)  $v_c = 5 \text{ V}$  ( $U_0 = 5 \text{ V}$ );

частота несущего колебания (**CarrierFrequency**)  $f_c = 250 \text{ kHz}$  ( $f_0 = 250 \text{ кГц}$ );

индекс модуляции (**ModulationIndex**)  $m_{\text{ЧМ}} = 5$ ;

частота модуляции (**Intelligence Frequency**)  $F_M = 20$  kHz ( $F_M = 20$  кГц) колебания, имитирующего низкочастотный модулирующий сигнал.

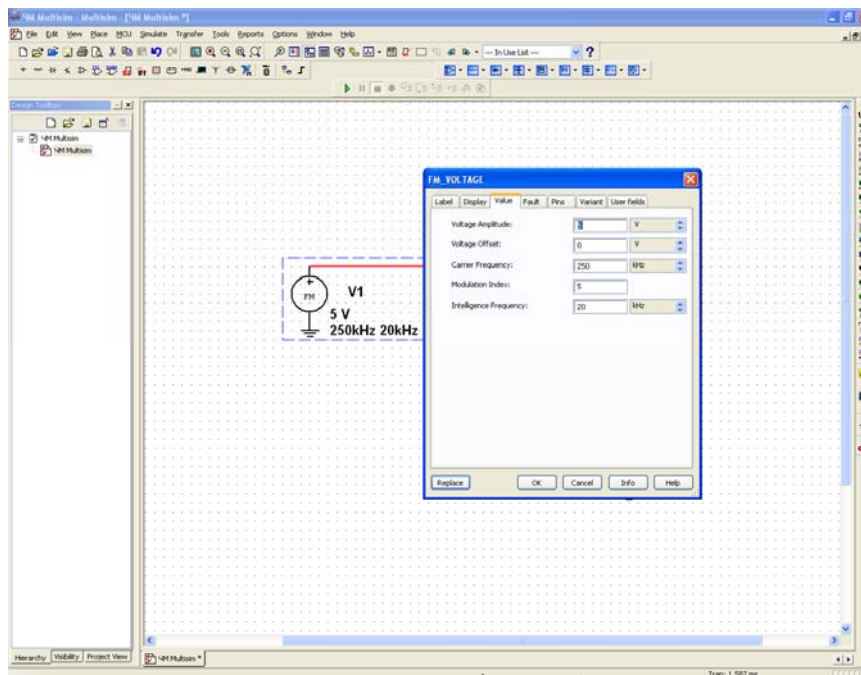


Рисунок 3.5 Ввод параметров ЧМ напряжения

#### 4.3 Исследование осциллограмм и спектров ЧМ сигнала при различных параметрах

Для исследования спектров установите элементы регулировки анализатора спектра в следующие ориентировочные положения:

Диапазон частот (**Span**): 400 kHz.

Начало (**Start**): 50 kHz.

Граница (**End**): 250 kHz.

Чувствительность (**Range**): 0.3 V/Div (В/дел).

Разрешение (**Resolution freq**): 200 Hz.

Вкладка **Set**: число точек разложения БПФ (**FFTpoints**): 8192.

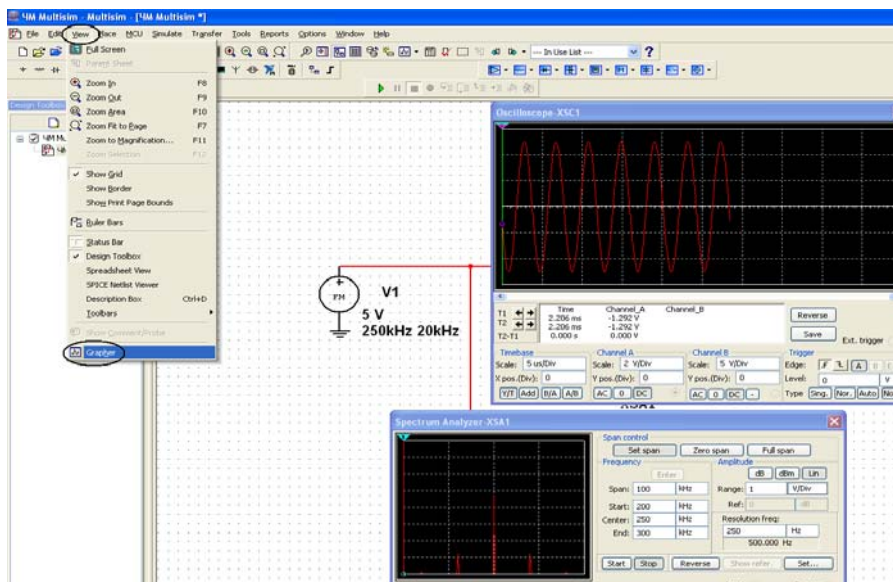
Для запуска эксперимента необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по зеленому треугольнику **Run** панели **Simulation** или во вкладке

**Simulate.** Зафиксируйте форму и спектр сигнала в соответствующем разделе отчета. Сделайте вывод о форме полученного ЧМ сигнала и его спектре.

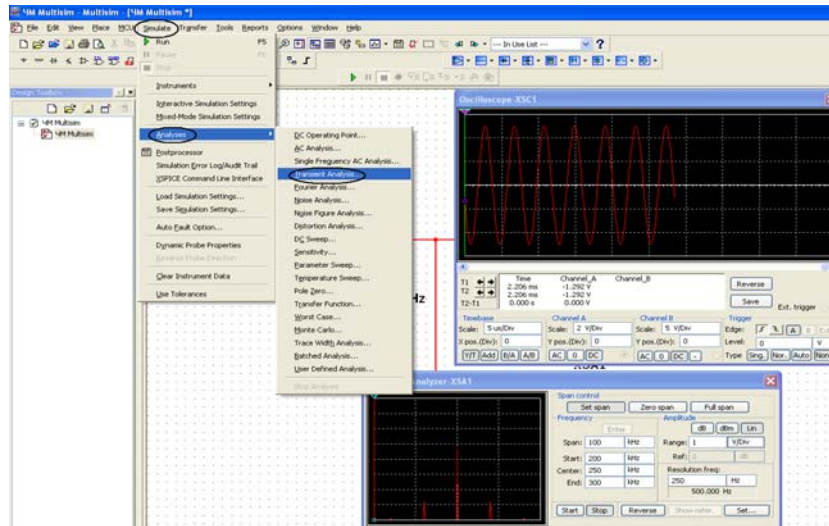
Повторите эксперимент при других коэффициентах и частотах модуляции ( $m_{\text{ЧМ}} = 0,5; 10$  и  $m_{\text{ЧМ}} = 5; F_M = 40$  кГц). При изменении параметров ЧМ сигнала положения элементов регулировки осциллографа и анализатора спектра необходимо изменять с учетом ожидаемых ширины спектра и уровней спектральных составляющих сигнала.

До сих пор контроль временных частотных характеристик исследуемых сигналов осуществлялся их наблюдением на экранах используемых виртуальных приборов (показанных на рисунке 3.6) после их открытия двойным щелчком левой кнопки мыши по пиктограмме выбранного прибора.

Возможен и весьма полезен вывод и накопление получаемых результатов с помощью самописца, включаемого выбором позиции **Grapher** выпадающего меню **View** (рисунок 3.6,а) или пункта **Analyses** и подпункта **TransientAnalyses ...** (Анализ переходных процессов) в меню **Simulate** (рисунок 3.6,б). При каждом запуске эксперимента кнопкой **Run** и его остановке кнопкой **Stop simulation** в самописце формируются вкладки с результатами.



а)



б)

Рисунок 3.6 Выбор видов вывода характеристик ЧМ напряжения

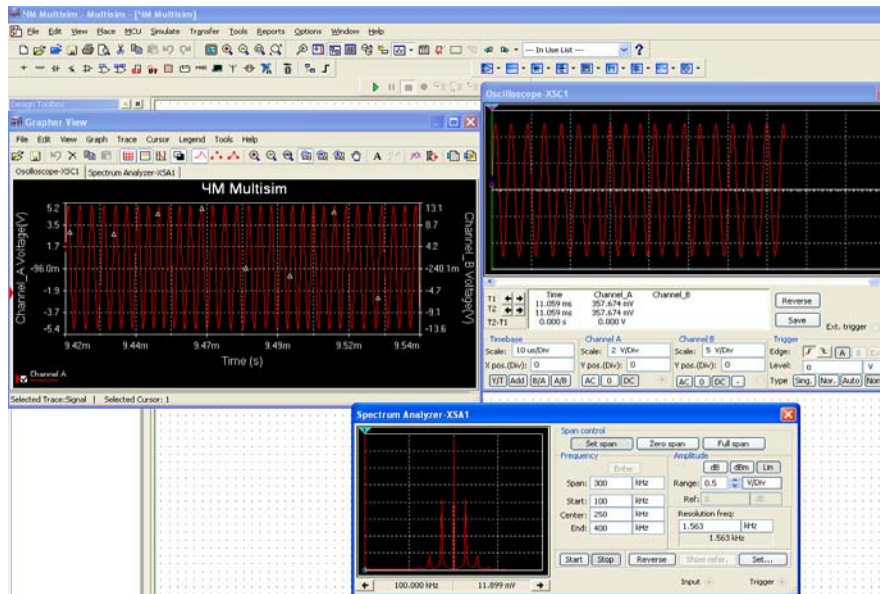


Рисунок 3.7 Виды вывода характеристик ЧМ напряжения

Для детального рассмотрения полученных результатов при нажатой левой кнопке мыши можно выделить интересующий фрагмент полученной характеристики, который будет показан более подробно в новом масштабе.

Полученные графики занесите в соответствующий раздел отчета.

Сделайте вывод о форме ЧМ сигнала и его спектре. Сравните полученные ЧМ сигналы с аналогичными кривыми, полученными в предварительном расчете.

### **5 Отчет о работе**

Отчет должен содержать:

- 1) название работы, задание и исходные данные для выполнения работы;
- 2) результаты предварительных расчетов (формулы, таблицы, графики, спектры);
- 3) результаты машинного эксперимента; графики исследуемых зависимостей;
- 4) анализ полученных результатов и выводы по работе.

Для защиты лабораторной работы должен быть представлен отчет, оформленный с соблюдением требований ЕСКД в рукописном или печатном виде.

### **6 Вопросы для самопроверки**

1. Что такое индекс модуляции?
2. Как зависит спектральный состав однотонового ЧМ сигнала от индекса модуляции?
3. Как расположены спектральные компоненты однотонового ЧМ сигнала относительно несущей частоты?
4. Как связаны ширина спектра ЧМ сигнала и индекс модуляции?
5. Поясните различие амплитудной и частотной модуляций?
6. Каков принцип радиосвязи с использованием ЧМ?

### **Литература**

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 2000. - 462 с.
2. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Радио и связь, 1986. - 512 с.

## Лабораторная работа 4

### Исследование временной дискретизации аналоговых сигналов

#### 1 Цель работы

Изучение методов дискретизации различных аналоговых сигналов и их моделирование с помощью программы *NIMultisim*, получение навыков использования данной программы для анализа временной дискретизации аналоговых сигналов.

#### 2 Задание

2.1 Изучить в процессе самостоятельной подготовки основные теоретические положения о дискретных сигналах (стр. 267-271 [1], стр. 512-515 [2] и стр. 4-8 [3].)

2.2 Ознакомиться с методами исследования временной дискретизации аналоговых сигналов.

2.3 Выполнить предварительный расчет дискретизации:

- а) аналогового сигнала с линейно изменяющимся напряжением;
- б) аналогового единичного сигнала;
- в) аналогового экспоненциального сигнала;
- г) аналогового двухполупериодного сигнала;
- д) аналогового косинусоидального сигнала;

Полученные данные занести в таблицу и построить графики данных дискретных сигналов.

2.3 Провести моделирование процесса дискретизации рассматриваемых сигналов и анализ полученных результатов.

#### 3 Краткие сведения о дискретных сигналах

Процесс замены аналогового сигнала его дискретными отсчетами обычно через равные промежутки времени называется дискретизацией сигнала по времени.

Отсчеты дискретного сигнала определены для дискретных значений независимой переменной времени и представляются последовательностью чисел. Таковую последовательность чисел можно записать в следующем виде

$$u(k) = \{u(k)\} = \{ \dots, u(-2), u(-1), u(0), u(1), u(2), \dots \}, \quad -\infty < k < \infty. \quad (1)$$



Дискретный сигнал обычно изображают в виде графика, аналогичного приведенному на рисунке 4.1. Дискретный сигнал  $u(k)$  определен только для целых значений  $k$ .

Например, дискретный единичный импульс (рисунок 4.2) определяется следующей формулой

$$\delta(k) = \begin{cases} 1, & k = 0; \\ 0, & k \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Дискретная единичная ступенчатая функция (рисунок 4.3) определяется следующим образом

$$1(k) = \begin{cases} 1, & k \geq 0; \\ 0, & k < 0. \end{cases} \quad (3)$$

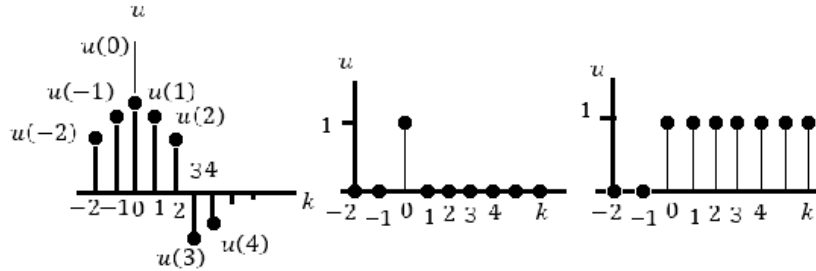


Рисунок 4.1

Рисунок 4.2

Рисунок 4.3

Интервал времени  $T_d$ , через который берутся отсчеты аналогового сигнала, называется периодом дискретизации. Величина  $F_d = 1/T_d$  называется частотой дискретизации. Значения дискретного сигнала в тактовые моменты называются отсчетами или выборками.

Для правильного выбора частоты или периода дискретизации следует использовать теорему Котельникова: аналоговый сигнал, не содержащий частот выше  $F_{max}$ , полностью определяется последовательностью своих значений в моменты времени, отстоящие друг от друга на

$$T_d \leq 1/(2F_{max}). \quad (4)$$

Если частота дискретизации достаточно большая и превышает частоту аналогового сигнала, то дискретные отсчеты позволят правильно восстановить аналоговый сигнал (рисунок 4.4). Если частота дискретизации небольшая по сравнению с частотой аналогового сигнала, то в этом случае дискретные отсчеты могут не позволить правильно восстановить аналоговый сигнал (рисунок 4.5).

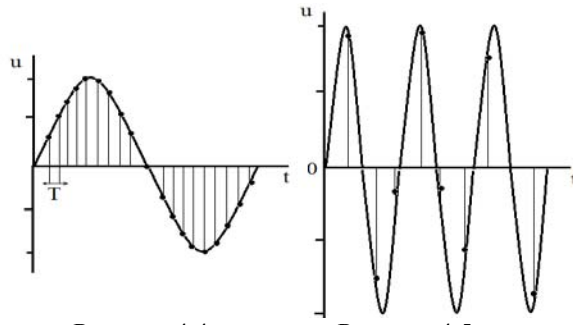


Рисунок 4.4

Рисунок 4.5

Если частота аналогового сигнала значительно больше частоты дискретизации, то наблюдается эффект ложной частоты (рисунок 4.6).

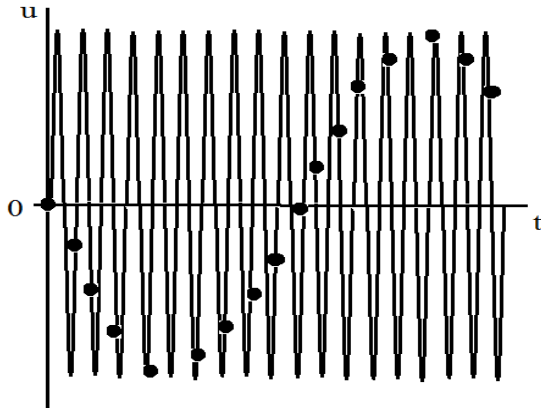


Рисунок 4.6

Как видно из этих графиков, неправильный выбор частоты дискретизации аналоговых сигналов может привести к потере информации, поскольку дискретный сигнал не учитывает поведения аналогового сигнала в промежутках между отсчетами.

Так, в современных цифровых аудиосистемах частоту дискретизации выбирают с запасом по отношению к теоретическому пределу слышимости в 20 кГц равной 44,1 или 48 кГц. В студийной аппаратуре обычно используют частоты дискретизации 56, 96 или 192 кГц. Это делается для того, чтобы сохранить высокочастотные гармоники звукового сигнала, не воспринимаемые человеческим ухом, которые вносят заметный вклад в формирование общей звуковой картины. Частоту дискретизации для телефонных сигналов выбирают равной 8 кГц,

Получить дискретный сигнал из аналогового сигнала можно, применив принцип амплитудно-импульсной модуляции (АИМ). Импульсный модулятор можно представить как умножитель с двумя входами и одним выходом. На первый вход импульсного модулятора подается аналоговый сигнал, подлежащий дискретизации, на второй вход - последовательность коротких синхронизирующих импульсов, следующих во времени через равные промежутки времени  $T_d$  (интервал дискретизации). На выходе образуется дискретный сигнал, величина выборок которого будет пропорциональна величине аналогового сигнала в точках отсчета (рисунок 4.7).

Математическая модель дискретного сигнала может быть записана в следующем виде

$$u(kT) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} u(nT)\delta(kT - nT), \quad (5)$$

где  $T = T_d$ ;  $\delta(kT - nT) = \begin{cases} 1, k = n; \\ 0, k \neq n. \end{cases}$

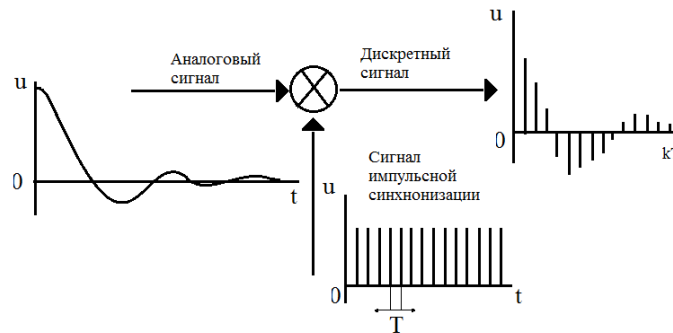


Рисунок 4.7

Заметим, что все члены данной суммы при  $n \neq k$  равны нулю.

Для изучения последовательности формирования дискретных сигналов проведем предварительный расчет процесса дискретизации аналоговых сигналов и моделирование процесса дискретизации с помощью ЭВМ.

#### 4 Предварительный расчет

Выполнить дискретизацию аналоговых сигналов (рисунок 4.8 - 4.12) на отрезке  $t = [0; 1]$  мс, при  $k = 0, 1, 2, \dots, 10$ , где  $k$  - номера отсчетов и при одинаковых интервалах между моментами времени.

Полученные данные занести в таблицу 1. Построить графики данных дискретных сигналов.

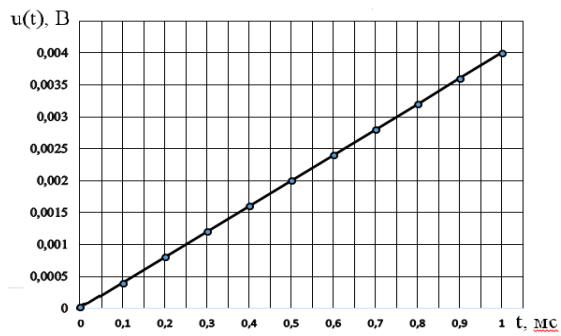


Рисунок 4.8  
Линейно изменяющееся  
напряжение (ЛИН)  
 $u_1(t) = 4t$  [В]

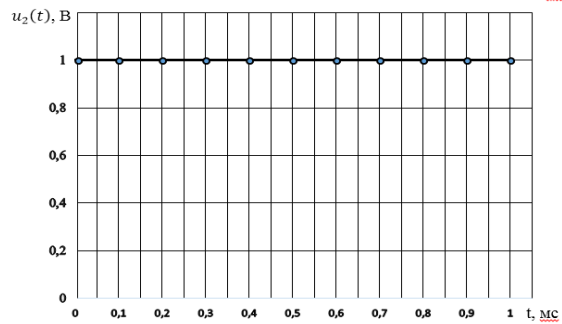


Рисунок 4.9  
Единичный сигнал  
 $u_2(t) = 1$  В

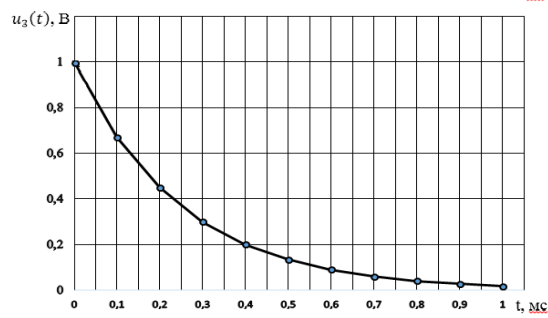


Рисунок 4.10  
Экспоненциальный сигнал  
 $u_3(t) = \exp(-4 \times 10^3 t)$  В

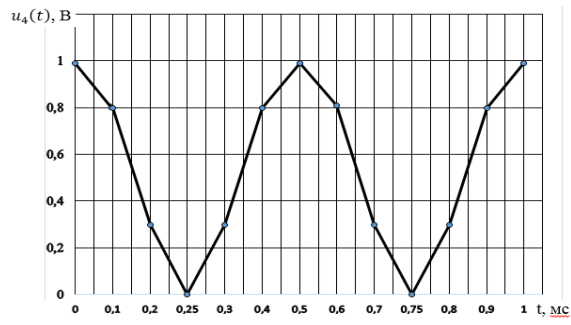


Рисунок 4.11  
Двухполупериодный сигнал  
 $u_4(t) = |\cos(2\pi ft)|$  В;

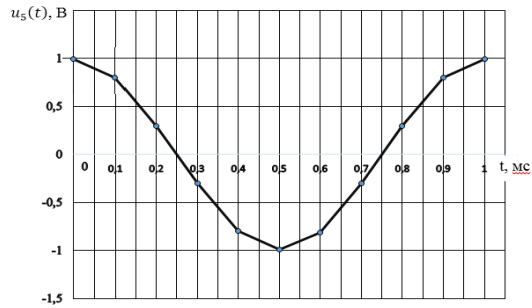


Рисунок 4.12  
Косинусоидальный сигнал  
 $u_5(t) = \cos(2\pi ft)$  В.

Таблица 1. Расчеты по дискретизации аналогового сигнала

По предварительному расчету						
k	t	$u_1(t)$	$u_2(t)$	$u_3(t)$	$u_4(t)$	$u_5(t)$
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

## 5 Порядок выполнения работы

Дискретизация различных аналоговых сигналов осуществляется амплитудным импульсным модулятором (АИМ) (рисунок 4.13), реализованным в программе *NIMultisim*.

Параметры функционального генератора и источника синхроимпульсов настраиваются после щелчка правой кнопкой мыши по их условному обозначению (рисунок 4.14).

Запустив режим моделирования, с помощью осциллографа наблюдаем последовательность синхроимпульсов и дискретизированный аналоговый синусоидальный сигнал (рисунок 4.15). Аналогичным образом можно исследовать процесс дискретизации кусочно-линейно-изменяющегося напряжения (ЛИН) – треугольного сигнала и кусочно-единичного сигнала, получаемых от функционального генератора.

Полученные графики в виде скрин-шотов занесите в соответствующий раздел отчета.

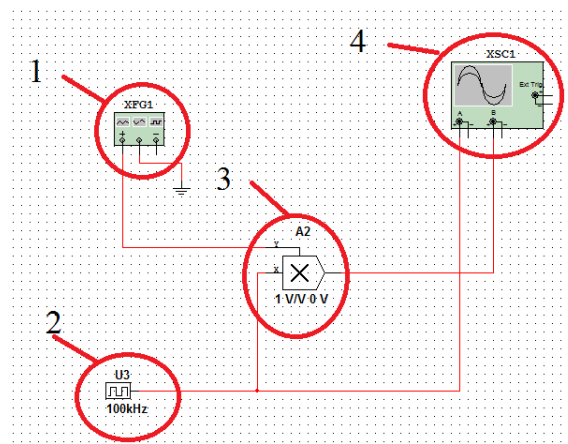


Рисунок 4.13 Функциональная схема АИМ:

- 1 - XFG1, функциональный генератор (источник аналогового сигнала);
- 2 – U3, источник синхроимпульсов; 3 – A2, двухвходовый умножитель;
- 4 – XSC1, осциллограф

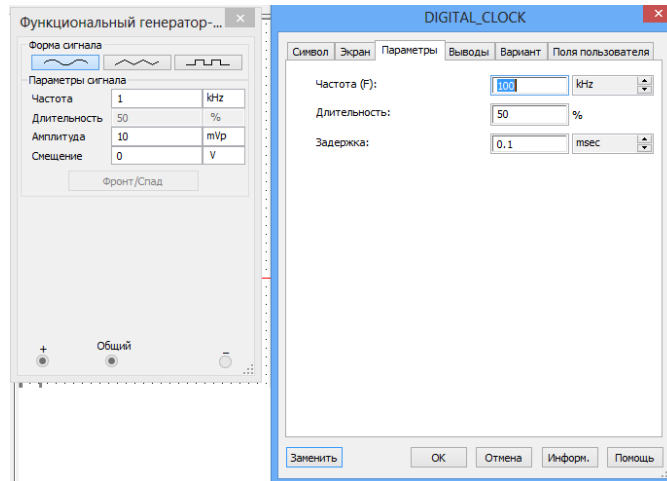


Рисунок 4.14 Настройка параметров функционального генератора и источника синхроимпульсов

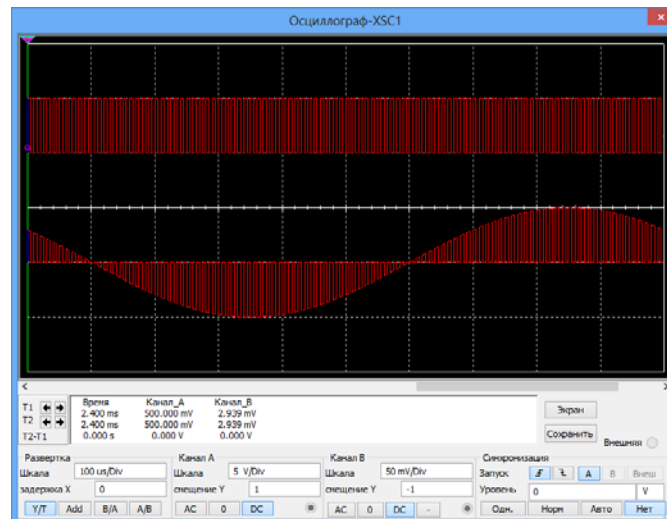


Рисунок 4.15 Дискретизация аналогового синусоидального сигнала

Проявление эффекта ложной частоты исследуется с помощью той же схемы (рисунок 4.13) при увеличении частоты синусоидального сигнала до 30 кГц и 95 кГц (рисунок 4.16).

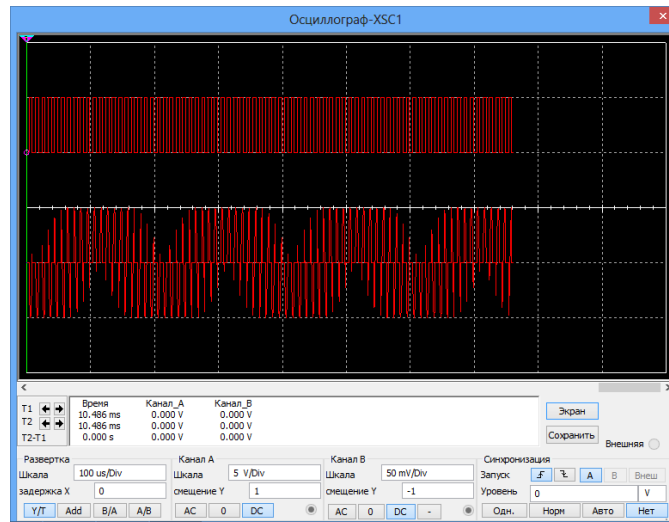


Рисунок 4.16 Эффект ложной частоты

Скрин-шоты занесите в отчет и сделайте вывод о возможности восстановления данного аналогового сигнала.

Для исследования дискретизации аналоговых двухполупериодного и экспоненциального сигналов необходимо собрать вспомогательные схемы двухполупериодного выпрямителя (рисунок 4.17) и формирователя экспоненциального сигнала (рисунок 4.18).

Двухполупериодный выпрямитель состоит из трансформатора Т1, двух диодов D1, D5 и резистора R3.



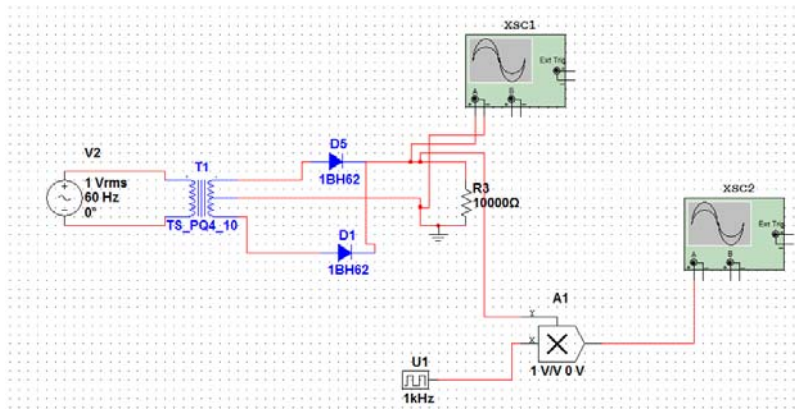


Рисунок 4.17 Дискретизация двухполупериодного сигнала

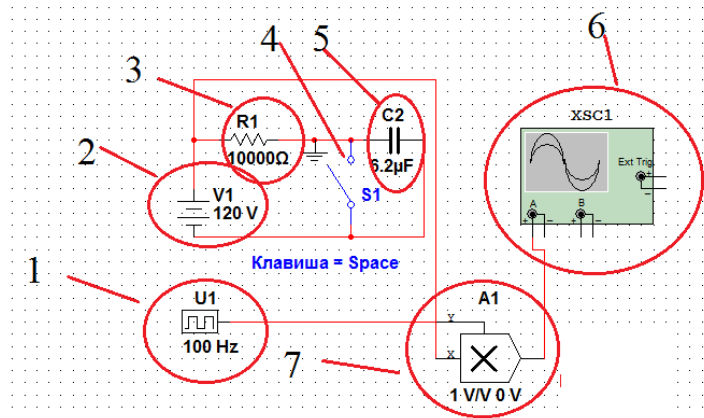


Рисунок 4.18 Дискретизация экспоненциального сигнала:  
 1 - U1, источник синхроимпульсов; 2 – источника питания;  
 3 – резистор на  $R1 = 10 \text{ кОм}$ ; 4 – ключ S1; 5 - конденсатор  $C2 = 6,2 \text{ мкФ}$ ;  
 6 - XSC1, осциллограф; 7 – A1, двухвходовый умножитель

Полученные графики дискретизации двухполупериодного и экспоненциального сигналов в виде скрин-шотов занесите в отчет. Сделайте выводы о качестве дискретизации аналоговых сигналов и оцените правильность выбора частоты и периода дискретизации.

## 6 Отчет о работе

Отчет должен содержать:

- 1) название работы, задание и исходные данные для выполнения работы;
- 2) результаты предварительных расчетов (формулы, таблицы, графики, спектры);
- 3) результаты машинного эксперимента; графики исследуемых зависимостей;
- 4) анализ полученных результатов и выводы по работе.

Для защиты лабораторной работы должен быть представлен отчет, оформленный с соблюдением требований ЕСКД в рукописном или печатном виде.

## 6 Вопросы для самопроверки

- 1 Какие системы называются дискретными?
- 2 Как происходит преобразование аналоговых сигналов в дискретные?
- 3 Что называют отсчетами аналоговых сигналов?
- 4 Как выбирается величина частоты (периода) дискретизации?
- 5 Почему частоту дискретизации нельзя выбрать произвольно?

## Литература

1. Фриск, В. В. Основы теории цепей/ В.В. Фриск. - М.: РадиоСофт, 2002. - 288 с.
2. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы/В. П.Баскаков, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук. - М.: Радио и связь, 2003. - 592 с.
3. Гольденберг, Л. М. Цифровая обработка сигналов/Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н.Поляк. – М.: Радио и связь, 1990. - 256 с.

## Лабораторная работа 5

### Исследование эффективности циклического кодирования и способов обнаружения и исправления ошибок

#### 1 Цель работы

Изучение методов помехоустойчивого кодирования информации, моделирования кодирующих и декодирующих устройств в программной среде *DELPHI*, исследование эффективности циклического кодирования при воздействии помех, вызывающих ошибки.

#### 2 Задание

2.1 Изучить в процессе самостоятельной подготовки основные теоретические положения по теории помехоустойчивого кодирования информации.

2.2 Ознакомиться с руководством к лабораторной работе, программным обеспечением, объемом и порядком выполнения работы.

2.3 Выполнить кодирование и декодирование заданных преподавателем сообщений, провести моделирование процессов кодирования и декодирования информации и анализ полученных результатов.

#### 3 Краткие сведения об оценке эффективности циклического кодирования

##### Показатели эффективности кодирования

Одной из важнейших характеристик эффективности избыточных кодов является вероятность необнаруженной (некорректируемой) ошибки  $P_{но}$  - вероятность выдачи декодером ошибочной кодовой комбинации. *Обнаруживающая способность циклических кодов зависит как от минимального кодового расстояния, так и от степени образующего полинома и его вида.*

Ошибка всегда обнаруживается, если ее кратность  $g$ , т.е. число искаженных символов кодовой комбинации (КК), меньше кодового расстояния:

$$g_0 \leq (d-1), \quad (3.1)$$

где  $d$  - *кодовое расстояние* между двумя комбинациями одинаковой длины - число бит, которыми данные комбинации отличаются. Оно равно

весу кодовой комбинации, полученной при суммировании двух КК по модулю два, т.е. числу ненулевых символов в кодовом слове (например, для кодовой комбинации  $x = 100110$  вес равен  $w(x) = 3$ ).

Исправление ошибки возможно, если ее кратность удовлетворяет неравенству

$$g_i \leq (d - 1)/2. \quad (3.2)$$

Оценку вероятности необнаруженной ошибки можно произвести по приближенной формуле

$$P_{\text{но}} \approx \frac{1}{2^r} \sum_{i=d}^n P(g=i), \quad (3.3)$$

где  $n$  - длина кодовой комбинации- блока (разрядность кода);  $g$ - кратность ошибки;  $r$  - число проверочных символов;  $d$ - кодовое расстояние (Хемминга);

или путем имитационного моделирования цифрового канала связи на ПК.

И в том, и в другом случае для оценки эффективности кодов необходимо располагать статистическими данными потока ошибок. Эти данные сводятся, например, в таблицу 1, как результат оценки

$$P(g=i) \approx N(g=i)/N, \quad (3.4)$$

где  $N$  - количество переданных кодовых комбинаций (блоков).

Таблица 1

$n$	$N$	$N(0)$	$N(1)$	$N(2)$	$N(3)$	$N(4)$	$P(1)$	$P(2)$	$P(3)$	$P(4)$

Непосредственная оценка обнаруживающих свойств циклических кодов (ЦК) проводится путем имитационного моделирования кодера и декодера циклического кода. При этом выясняются обнаруживающие способности кода для выбранного образующего полинома. Данные потока ошибок сводятся в таблицу 1. В этом случае

$$P_{\text{но}} \approx N_{\text{ош}}/N, \quad (3.5)$$

где  $N_{\text{ош}}$  – количество блоков, в которых ошибка есть, но она не обнаружена;  $N$  – количество переданных блоков.

Поток ошибок получают на основе действующего цифрового канала связи. При выполнении научных исследований на первых этапах исследования можно ограничиться математической моделью источника ошибок на ЭВМ.

### Модели источника ошибок

В случае, когда элементарные ошибки в канале появляются независимо с вероятностью  $P_e$ , вероятность появления в  $n$ -элементной комбинации  $g$  ошибок  $P(g, n)$  определяется биномиальным распределением

$$P(g, n) = C_n^g P_e^g (1 - P_e)^{n-g};$$

$$C_n^g = \frac{n!}{g!(n-g)!}. \quad (3.6)$$

Вероятность приема неискаженной комбинации ( $g = 0$ )

$$P(0, n) = (1 - P_e)^n, \quad (3.7)$$

а вероятность появления  $m$  и более ошибок

$$P(\geq m, n) = \sum_{g=m}^n C_n^g P_e^g (1 - P_e)^{n-g}. \quad (3.8)$$

Существует достаточно много моделей ошибок в канале связи (Гильберта, Бергера – Мандельброта, Беннета – Фройлиха, Попова – Турина). С точки зрения адекватности модели реальным каналам наиболее перспективной следует считать модель дискретного канала с переменными параметрами.

Моделирование потока ошибок в дискретном канале. Обозначим через 0 правильно принятый элемент, а через 1 – элемент, принятый неправильно. Это так называемый посимвольный метод описания ошибок в дискретном канале. На практике чаще всего используется другой метод – поинтервальный. Сущность его заключается в записи потока ошибок в виде последовательности чисел, равных длинам интервалов между двумя последовательными ошибками и выраженных в единичных элементах.

Пример. Записать представление потока ...01001010000011..., используя поинтервальный метод описания ошибок в дискретном канале. Ответ. ...2150...

Реализация математической модели источника ошибок на ЭВМ состоит в генерировании случайной последовательности неискаженных интервалов в соответствии с законом их распределения. Для каналов с независимыми ошибками (каналов без памяти) длина интервала между ошибками  $\tau$  подчиняется геометрическому закону

$$p(\tau) = P_e(1 - P_e)^{\tau-1} \quad (3.9)$$

Для канала с памятью, описываемого моделью Бергера – Мандельброта, интегральная функция распределения длин интервалов между ошибками подчиняется закону Парето с показателем  $\alpha < 1$ :

$$F(\tau) = \begin{cases} 1 - \tau^{-\alpha}, & \tau \geq 1; \\ 0, & \tau = 0. \end{cases} \quad (3.10)$$

В (3.10) коэффициент  $0 < \alpha < 1$  зависит от скорости и вида модуляции, типа канала связи, степени группирования ошибок в канале связи и др. Если  $\alpha \approx 0,1$  - это соответствует биномиальной модели. В этом случае нет пакетирования (группирования) ошибок. Наибольшее значение  $\alpha$  (от 0,5 до 0,7) наблюдается в кабельных линиях связи (кратковременное прерывание связи). В радиорелейных линиях (где бывают интервалы с большой интенсивностью ошибок и интервалы с редкими ошибками)  $\alpha = 0,3 \dots 0,5$ ; для некоторых линий коротковолновой радиосвязи  $\alpha = 0,3 \dots 0,4$ .

#### 4. Порядок выполнения лабораторного задания

Структура исследуемой системы связи представлена на рисунке 1.

Лабораторная работа выполняется на ПК, причем использование программного продукта не представляет затруднений для понимания и не требует дополнительного пояснения.

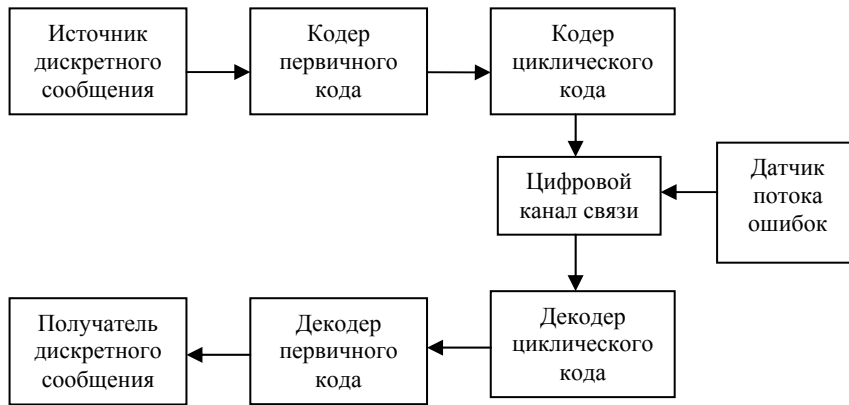


Рисунок 1 Структура цифрового канала связи

Работа реализована в программной среде *DELPHI*:

1. Кодер первичного кода (КОИ – 7 или КОИ – 8).
2. Датчик потока ошибок.
3. Кодер циклического кода.
4. Декодер (обнаружение ошибок) циклического кода.

При выполнении ЛР производится количественная оценка коэффициента необнаружения ошибок ЦК по выражениям (3.4) и (3.5) в следующей последовательности:

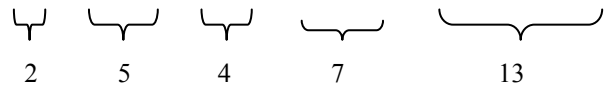
1. Формируется дискретное сообщение, например:  
... ТРУД СДЕЛАЛ ИЗ ОБЕЗЬЯНЫ ЧЕЛОВЕКА ...
2. С использованием программы, моделирующей кодеры первичного и циклического кодов, осуществляется поблочное кодирование текста первичным, а затем циклическим кодом.
3. С помощью подпрограммы датчика потока ошибок формируется последовательность ошибок. Пример последовательности может иметь вид:

.... 2 5 4 7 13 .....

4. В соответствии с потоком ошибок студент вносит искажения в закодированное сообщение. Допустим, неискаженная кодовая последовательность с  $n = 7$  имеет вид:

1001100 0011110 0100010 1010101 0101001.

После искажения в соответствии с потоком ошибок получим:

10 **1** 11000 **0** 1111 **0** 0100010 **1** 0101010101001,  
  
 2      5      4      7      13

где жирным шрифтом обозначены внесенные ошибки.

5. Анализ искаженного сообщения и заполнение таблицы 1.

6. Получение количественной оценки коэффициента необнаружения ошибок в соответствии с выражением (3.4).

7. Искаженное сообщение поблочко декодируется, и по синдрому ошибки (остатку) выносится решение об обнаружении ошибки или ее отсутствии. Если синдром ошибки равен 0, а ошибка на самом деле присутствует, значит, она не обнаружена. Подсчитав количество блоков  $N_{\text{ош}}$ , в которых ошибка не обнаружена, и подставив эту величину в выражение (3.5), получим количественную оценку коэффициента необнаружения ошибок, но с учетом вида образующего полинома.

Примечание. Вариант канала связи ( $\alpha$ ) и характеристики циклического кода ( $n, k$ ) преподаватель задает персонально на каждое рабочее место.

## 5. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Название работы, задание и исходные данные для выполнения работы.
2. Структура исследуемой системы связи.
3. Дискретное сообщение и его представление в виде первичного и помехоустойчивого кодов.
4. Реализация потока ошибок.
5. Искаженное дискретное сообщение.
6. Заполненная таблица 1.
7. Результаты расчета по формулам (3.4) и (3.5).



8. Вывод по результатам исследований.

**Литература**

- 1 Авиационные радиосвязные устройства./ Под ред. В.И. Тихонова. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1986.
- 2 Абдуллаев Д.А., Арипов М.Н. Передача дискретных сообщений в задачах и упражнениях. - М.: Радио и связь, 1985.