

## Лабораторная работа №3

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

### 1. Цель работы

Углубить теоретические сведения о временных и спектральных характеристиках сигналов передачи данных и провести экспериментальное исследование этих характеристик. Приобретение практических навыков измерения временных и спектральных параметров немодулированных и модулированных сигналов.

### 2. Основные теоретические положения

#### 2.1. Общая характеристика немодулированных и модулированных сигналов данных

Сигналом называется некоторая физическая величина (электрический ток, напряжение, электромагнитное поле, звуковые волны и т. п.), однозначно отображающая сообщение. Зная закон, связывающий сообщение и сигнал, получатель может выявить содержащиеся в сообщении сведения. Для получателя сообщения сигнал заранее не известен и поэтому он является случайным процессом.

В системах передачи данных для отображения цифровых сообщений (1 и 0) используются однополярные или двухполярные импульсы постоянного тока (видеоимпульсы) и импульсы переменного тока (радиоимпульсы). Вид таких сигналов показан на рисунке 2.1.

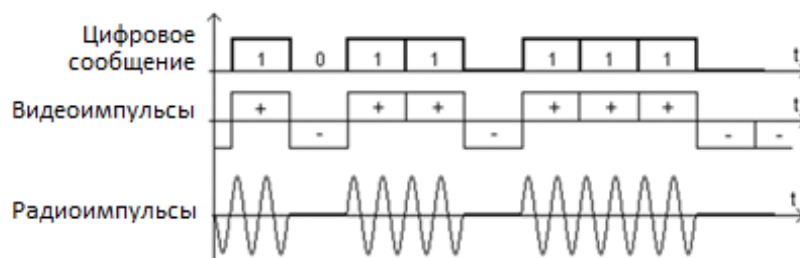


Рисунок 2.1 – Осциллограммы видео- и радиоимпульсов

Импульсы постоянного тока применяются при передаче сигналов по физическим линиям связи, а импульсы переменного тока — для передачи по каналам связи. Частота сигналов переменного тока обычно совпадает со средней частотой полосы пропускания канала.

К временным параметрам сигнала относится **длительность единичного элемента  $\tau_0$** , для периодической последовательности единичных элементов – **период  $T$**  и **скважность  $\alpha = T/\tau_0$**  (рисунок 2.2). **Количество единичных элементов  $B$ , передаваемых в единицу времени, называется скоростью манипуляции.** Эта величина получила размерность Бод.

$$B = 1/\tau_0.$$

**Частота периодической последовательности** со скважностью  $\alpha$  связана со скоростью манипуляции следующим соотношением:  $F = 1/T = 1/(\alpha\tau_0) = B/\alpha$ .

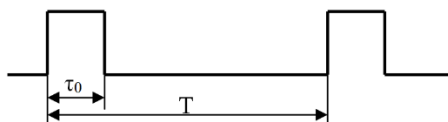


Рисунок 2.2 – Периодическая последовательность прямоугольных импульсов

Для преобразования импульсов постоянного тока в радиоимпульсы используется **генератор вспомогательных (несущих) колебаний**, имеющих **гармоническую (синусоидальную) форму**. Процедура преобразования импульсов постоянного тока в последовательность гармонических посылок называется **модуляцией**. Роль модулирующего колебания в процессе модуляции выполняет **информационный сигнал**, спектр которого необходимо перенести в полосу пропускания канала. В системах передачи данных модулирующим колебанием является последовательность дискретных импульсов. Модулируемым колебанием (несущей) обычно является синусоидальное колебание.

В процессе **модуляции может изменяться (модулироваться) один из параметров несущего колебания: амплитуда, частота или начальная фаза**. В результате формируются радиосигналы с **амплитудной (АМ), частотной (ЧМ) или фазовой модуляцией**. На практике применяются модулированных сигналы, при которых одновременно изменяются два или все три параметра несущего колебания (**АФМ, ЧФМ и др.**). Скачкообразное изменение параметров несущего колебания называют также **манипуляцией** или телеграфией. Для различения сокращенных обозначений модуляции от манипуляции зачастую амплитудная, частотная и фазовая манипуляция обозначается соответственно **АТ (амплитудная телеграфия), ЧТ и ФТ**. В системах передачи цифровых сигналов только манипуляция сигналов. На рисунке 2.3 показаны различные виды манипуляции. На верхнем графике рисунка 2.3 изображены однополярные информационные сигналы данных, а на втором – соответствующие им биполярные сигналы. На третьем графике показана гармоническая несущая, параметры которой (амплитуда, частота и начальная фаза) не изменяются со временем. На последующих графиках изображены временные диаграммы АМ-, ЧМ- и ФМ-сигналов соответственно. Как видно из диаграмм, изменению значения информационного сигнала соответствует изменение одного из параметров несущего колебания.

**Различают абсолютную (ФМ) и относительную (ОФМ) фазовую модуля-**

цию. ОФМ носит также название **дифференциальная фазовая модуляция (ДФМ)**. При абсолютной двухпозиционной фазовой манипуляции (англ. обозначение BPSK - *BinaryPhaseShiftKeying*) фаза модулированного колебания при значении входного сигнала равного уровню логического "0" совпадает со значением фазы опорного (несущего) напряжения ( $\Delta\varphi=0^0$ ), а при поступлении "1" – меняется на противоположную ( $\Delta\varphi=180^0$ ). То есть, фаза модулированного колебания меняется всякий раз при изменении значения входного сигнала. В случае дифференциальной (относительной) фазовой манипуляции **ДФМ (DPSK - *DifferentialPhaseShiftKeying*)**, фаза текущего колебания изменяется не по отношению к опорному колебанию, а по отношению к фазе предыдущей посылки.

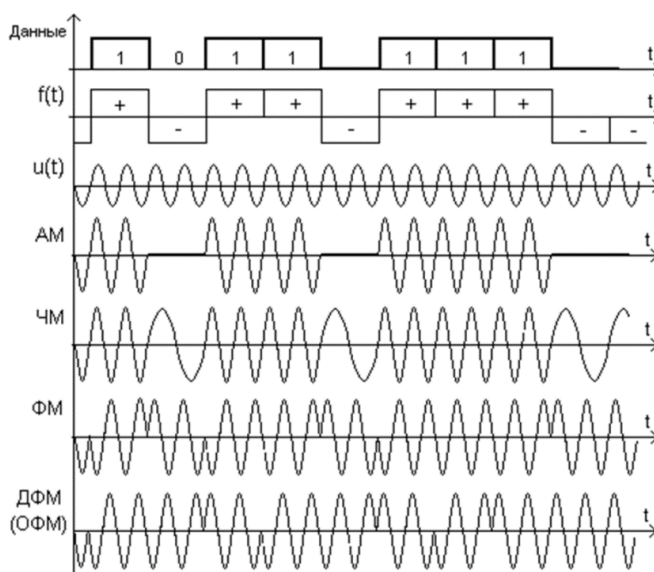


Рисунок 2.3 – Временные диаграммы различных видов манипуляции

Из временной диаграммы видно, что скачкообразное изменение фазы модулированного колебания на  $180^0$  происходит в случае абсолютной фазовой модуляции при каждом изменении знака модулирующего сигнала, а при относительной (дифференциальной) – каждом единичном значении сигнала данных.

Форма модулирующего сигнала выбирается близкой к прямоугольной. При этом исходят из соображений наибольшего удобства реализации приёмных устройств, обеспечивающих высокую помехоустойчивость. Однако с целью сокращения ширины спектра сигнала в ряде случаев используют сигнал с плавным изменением огибающей.

При передаче дискретной информации по непрерывным каналам связи используются как простые методы модуляции: АМ, ЧМ, ФМ, ДФМ (рисунок 2.1), так и **комбинированные – одновременное изменение нескольких параметров сигнала (чаще всего амплитуды и фазы).**

Повышение скорости передачи информации при неизменной скорости модуляции может быть обеспечено за счет **увеличения количества значащих позиций модулированного сигнала.** Это свойство используется в большинстве

современных систем передачи данных. Простейшим вариантом многопозиционной модуляции является **двукратная (4-позиционная) дифференциальная фазо-разностная (относительно-фазовая) манипуляция (ДФМ)**, при которой модулированный сигнал принимает 4 значения фазы. При 4-позиционной модуляции один элемент сигнала содержит два бита данных. На рисунке 2.4 изображены векторное и временное представление 4-позиционных ДФМ-сигналов с двумя вариантами значений начальных фаз  $0^0$ ;  $90^0$ ;  $180^0$  и  $270^0$ , либо  $45^0$ ;  $135^0$ ;  $225^0$  и  $315^0$ . Векторное представление сигналов называют также «сигнальным созвездием». При больших значениях позиций сигналов на сигнальном созвездии изображаются только геометрическое место точек концов векторов.

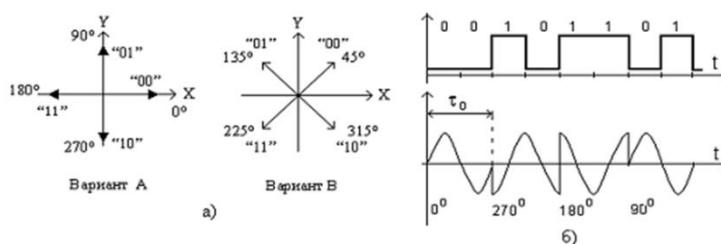


Рисунок 2.4 – Векторные (а) и временные (б) диаграммы 4-позиционной ФРМ

Формирование ФМ-сигналов со сдвигом фазы на  $180^0$  легко осуществляется путем инвертирования колебаний генератора несущей частоты. Для получения модулированных колебаний с числом позиций фаз больше двух используют **два колебания, имеющих одинаковую частоту, но сдвинутых по фазе на  $90^0$ , т.е. находящихся в квадратуре**. В этом случае говорят о так называемой **квадратурной фазовой модуляции (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)**.

Модуляция QPSK является частным случаем квадратурной амплитудной модуляции QAM-4, при котором информационный сигнал отображается изменением фазы несущего колебания с шагом  $90^0$ .

## 2.2 Спектры немодулированных сигналов передачи данных

Сигналы постоянного тока широко используются при передаче данных по симметричным и кабельным линиям связи. При этом используются однополярные двоичные (1,0) или биполярные двоичные (+1,-1) и квазитроичные (+1, 0, -1) импульсы. Любой сложный периодический сигнал можно разложить в ряд Фурье по гармоническим составляющим, т.е. представить его в виде суммы гармонических колебаний с частотами, кратными частоте повторения этого сигнала:

$$u(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\Omega t - \varphi_k),$$

где  $u(t)$  – разлагаемый периодический сигнал;  $k$  – номер гармоники ( $k = 1, 2, \dots$ );  $C_0$  — постоянная составляющая;  $C_k$  — амплитуды гармоник;  $\varphi_k$  — начальные фазы гармоник;  $\Omega$  — круговая частота повторения равная  $2\pi/T$ , здесь  $T$  — период повторения функции  $u(t)$ .

### 2.3. Спектры дискретных модулированных сигналов

При амплитудной модуляции модулирующий сигнал изменяется по произвольному закону  $f(t)$ , причем предполагается, что максимальное и минимальное значение амплитуды равны соответственно:  $\Delta U_{\text{МАКС}} = +1$  и  $\Delta U_{\text{МИН}} = -1$ . Если амплитуду модулирующего напряжения обозначить  $\Delta U$ , то амплитуда модулированного напряжения будет изменяться по закону

$$U_1 = U_M + \Delta U f(t) = U_M \left[ 1 + \frac{\Delta U}{U_M} f(t) \right] = U_M [1 + m f(t)]$$

где  $m$  - коэффициент модуляции ( $m = \Delta U / U_M$ ).

Модулированный сигнал можно представить как сумму двух сигналов, имеющих одинаковую частоту  $\omega_0$ , но отличающихся значением начальной фазы. Тогда модулированный сигнал запишется так:

$$U_{AM} = U_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_M [1 + m f(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (2.1)$$

Для наиболее часто применяемой стопроцентной модуляции ( $m=1$ ):

$$U_{AM} = U_M [1 + f(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Здесь и в дальнейшем мы будем рассматривать спектры модулированных колебаний в двух случаях: когда  $f(t)$  представляет периодическую последовательность прямоугольных посылок и когда  $f(t)$  является гармоническим колебанием. Первый случай амплитудной модуляции получил название *двоичной амплитудной модуляции*. В общем случае манипуляции  $f(t)$  может принимать конечное число значений. Первый случай соответствует процессам, имеющим место в системах передачи дискретной информации, а второй позволяет путем сравнения с первым сделать ряд полезных выводов.

Для определения спектра  $U_{AM}$  достаточно спектральное разложение в ряд Фурье  $f(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\Omega t)$  подставить в формулу (2.1). В случае последовательности прямоугольных посылок при  $U_0 = 1$ :

$$f(t) = \frac{1}{\alpha} + \frac{2}{\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\frac{\pi k}{\alpha})}{\frac{\pi k}{\alpha}} \cos(k\Omega t), \quad (2.2)$$

где  $\Omega = \frac{2\pi}{T}$  – круговая частота повторения посылок,  $T$  – период следования посылок. Подставляя (2.2) в (2.1), получим:

$$U_{AM} = \frac{U_M}{\alpha} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{U_M}{\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\frac{\pi k}{\alpha})}{\frac{\pi k}{\alpha}} \{ \sin[(\omega_0 + k\Omega)t + \varphi_0] + \sin[(\omega_0 - k\Omega)t + \varphi_0] \}. \quad (2.3)$$

Отсюда видно, что спектр амплитудно-манипулированного сигнала содержит несущую частоту и две боковые полосы — верхнюю и нижнюю. Форма боковых частот спектра манипулированного сигнала аналогична форме спектра модулирующих посылок, но спектр модулированного сигнала вдвое шире спектра модулирующих посылок.

В случае модулирующей функции  $f(t) = \sin(\Omega t)$  спектр амплитудно-модулированного сигнала также состоит из несущей частоты и двух боковых частот:

$$U_{AM} = U_M [1 + \sin(\Omega t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_M \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{U_M}{2} \sin[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi_0] - \frac{U_M}{2} \sin[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi_0].$$

Полученные выводы могут быть распространены на модулирующие сигналы произвольной формы.

При *фазовой модуляции*, при изменении модулирующего сигнала по закону  $f(t)$  и максимальном изменении начальной фазы на величину  $\Delta\varphi$  фаза сигнала изменяется по закону:

$$\theta = \omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi f(t).$$

Мгновенное значение фазомодулированного напряжения имеет следующий вид:

$$U_{\phi M} = U_M \cos\theta = U_M \cos[\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi f(t)], \quad (2.4)$$

где  $\Delta\varphi$  – **девиация фазы** или, как еще ее называют, *индекс фазовой модуляции*. Чем больше изменение модулируемого параметра, тем, очевидно, легче отличать друг от друга значения передаваемых сигналов на приеме. Поэтому значения девиации фазы следует выбирать возможно большим, т. е.  $\Delta\varphi = 90^\circ$ . При модуляции серией прямоугольных импульсных посылок (фазовая манипуляция), показанных на рисунке 2.4 а, фазоманипулированный сигнал при  $\Delta\varphi = 90^\circ$  имеет вид, показанный на рисунке 2.4 б.

Модулированный сигнал можно представить как сумму двух сигналов, имеющих одинаковую частоту  $\omega_0$ , но отличающихся значением начальной фазы. В частности, для случая  $\Delta\varphi = 90^\circ$ , изображенного на рисунке 2.4б, эти сиг-

налы показаны на рисунках 2.4,в и 2.4,г. Их несущие частоты отличаются по фазе на  $2\Delta\varphi = 180^\circ$ . Перепишем выражение (2.4) следующим образом:

$$U_{\phi M} = U_M \left\{ \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos[\Delta\varphi f(t)] - \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin[\Delta\varphi f(t)] \right\}. \quad (2.5)$$

В случае фазовой манипуляции прямоугольными посылками

$$f(t) = \begin{cases} -1 & \text{при } n\tau_0 \leq t \leq (n+1)\tau_0 \\ +1 & \text{при } (n-1)\tau_0 \leq t \leq n\tau_0 \end{cases}$$

Получим:

$$U_{\phi M} = U_M \left[ \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \cos\Delta\varphi - f(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \sin\Delta\varphi \right]. \quad (2.6)$$

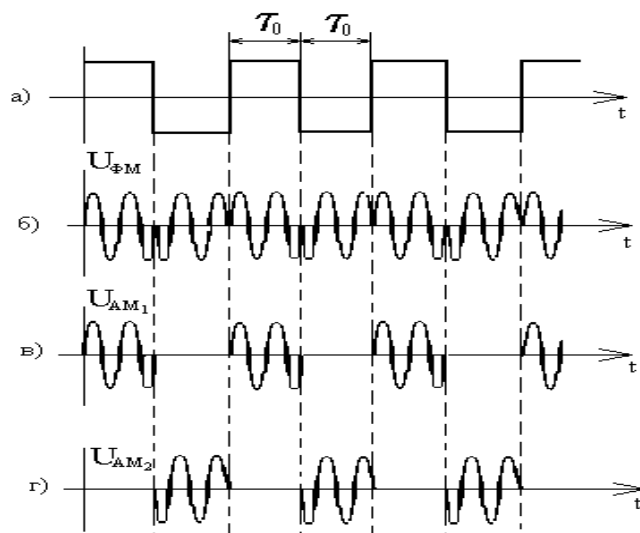


Рисунок 2.4 – Временные диаграммы сигналов при фазовой манипуляции:

- а) – модулирующий сигнал; б) – фазоманипулированный сигнал;  
в), г) – составляющие фазоманипулированного сигнала;

Таким образом, в общем случае спектр ФМ колебания содержит несущую, симметрично от которой располагаются боковые составляющие, отстоящие на частотные интервалы, кратные частоте манипуляции. В рассматриваемом случае  $\Delta\varphi = 90^\circ$  спектр ФМ становится равным спектру АМ при подавлении несущего колебания.

## 2.4. Связь между скоростью передачи и шириной канала

Знание спектров сигналов, используемых для передачи данных, динамики их изменения при различных видах сигналов, способов и параметров модуляции, а также переходных процессов в каналах при передаче этих сигналов, поз-

воляет установить соотношения между скоростью передачи и требуемой шириной полосы пропускания используемого канала связи.

На практике нет необходимости (да и возможности) передавать весь спектр сигнала. Достаточно передать лишь те составляющие, в которых сосредоточена основная часть энергии (>50%). Так например, при передаче “точек” импульсами постоянного тока, основная часть энергии содержится в двух первых компонентах спектра: постоянной составляющей и первой гармонике с частотой  $f=1/2\tau_0$ , где  $\tau_0$  - длительность единичного элемента. Следовательно, минимально необходимая полоса частот канала связи в этом случае равна

$$\Delta F_{\min} = 1/(2\tau_0) = B/2, \text{ а } B_{\max} = 2\Delta F_{\text{эф.}}$$

где  $B$  — скорость модуляции, Бод.

При передаче модулированных сигналов предельная скорость модуляции снижается вдвое за счет передачи двух боковых полос, т.е.:

$$\Delta F_{\min} = 1/\tau_0 = B, \text{ а } B_{\max} = \Delta F_{\text{эф.}}$$

### 3. Описание лабораторной установки

В качестве лабораторной установки используется демонстрационная версия системы Proteus. Для генерации немодулированных однополярных сигналов служит генератор прямоугольных импульсов с регулируемой частотой и скважностью импульсов. На рисунке 3.1 показана настройка генератора прямоугольных импульсов в качестве источника периодической последовательности вида 1:4 амплитудой 1 В, следующей с частотой 10 кГц.

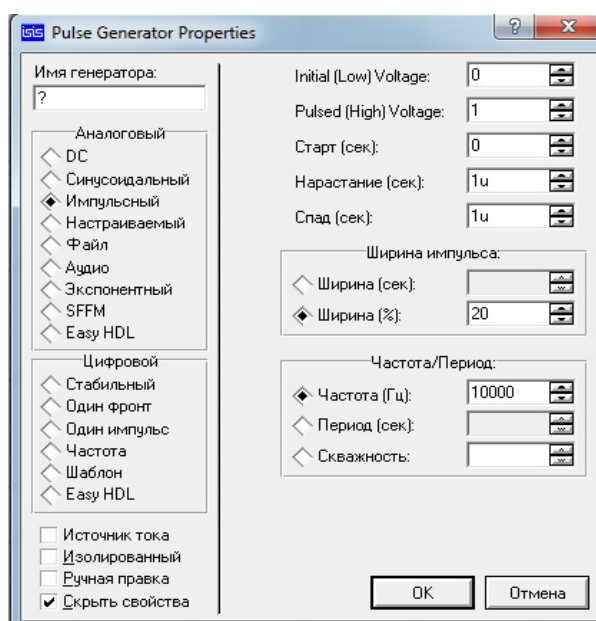
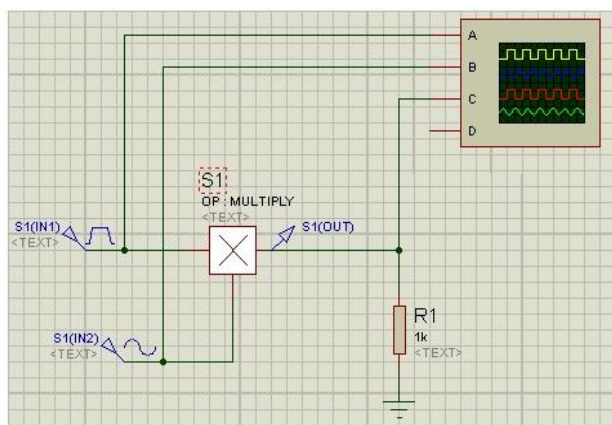


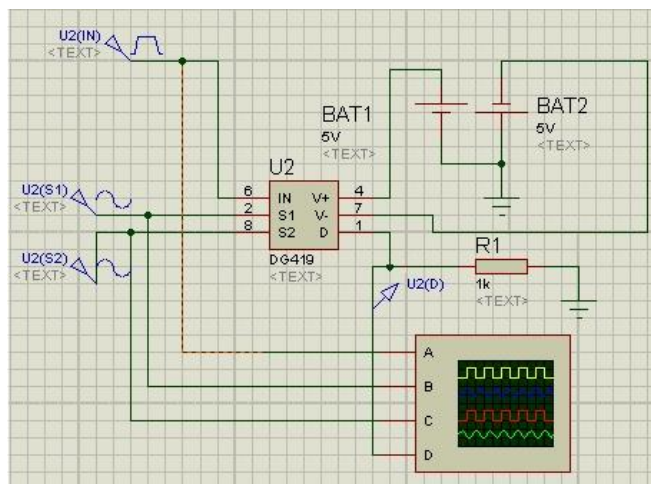
Рисунок 3.1 – Задания источника прямоугольной последовательности с частотой 10 кГц вида 1:4



Для изменения вида последовательности необходимо изменять ширину импульса при неизменном периоде (частоте).



а)



б)

Рисунок 3.2 – Схема амплитудного (а) и частотного (б) модуляторов

В качестве амплитудного модулятора служит перемножитель сигналов Laplace Multiplication Operator, а в качестве частотного модулятора – аналоговый ключ DG419, осуществляющий коммутацию колебаний одного из генераторов гармонических колебаний под управлением информационных сигналов, формируемых генератором прямоугольных импульсов с регулируемой скважностью. Вид окна при измерении спектра частотных сигналов показан на рисунке 3.3.

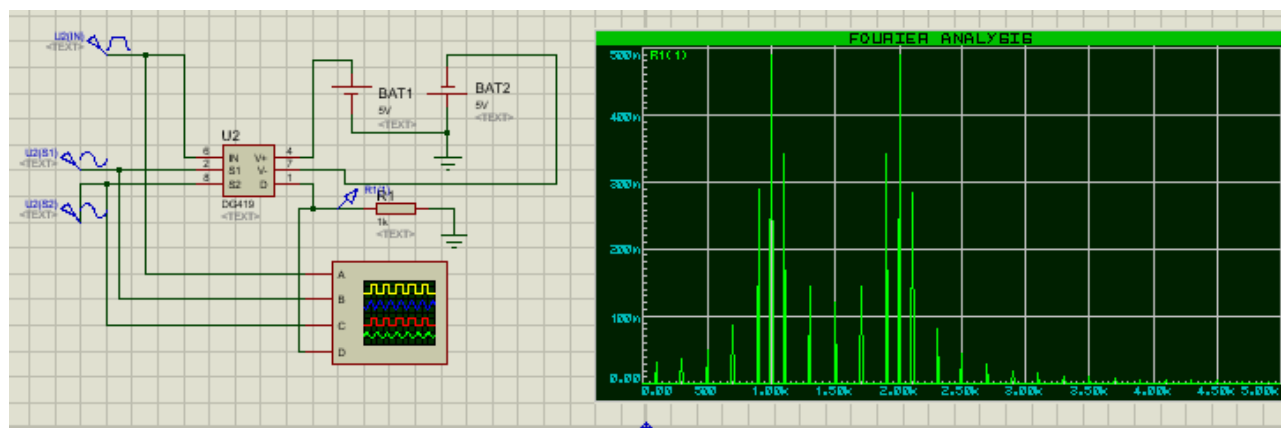


Рисунок 3.3 – Вид окна симулятора при измерении спектра ЧМ-сигналов

Для генерации фазомодулированных сигналов достаточно в схеме, изображенной на рисунке 3.3, необходимо установить одинаковыми частоты генераторов синусоидальных сигналов, а затем в процессе редактирования свойств

второго генератора изменить начальную фазу колебаний генератора (Phase Degrees) с  $0^\circ$  на нужный сдвиг фазы.

#### **4. Программа и методика исследования**

1. Составить схему для исследования временных и спектральных характеристик немодулированных сигналов вида 1:1, 1:3, 1:4 и 1:9 сигналов. Передаваемых со скоростью 1000 Бод.
2. Измерить скорость передачи сигналов, скважность и частоту импульсов.
3. Исследовать спектры немодулированных сигналов вида 1:1, 1:3, 1:4 и 1:9 и измерить частоты и амплитуды спектральных составляющих.
4. Составить схемы формирования АМ-, ЧМ- и ФМ-сигналов.
5. Снять осциллограммы информационного и модулированного АМ-, ЧМ- и ФМ-сигналов и измерить временные параметры сигналов вида 1:2; 1:4; 1:9, передаваемых со скоростью  $(i+1)1000$  Бод, где  $i$  – последняя цифра номера зачетной книжки. Частота несущей для АМ  $(i+1)10000$  Гц, Нижняя частота при ЧМ равна  $(i+1)1000$  Гц, а верхняя частота в 2 раза выше нижней. Скорость манипуляции при ЧМ  $(i+1)100$  Бод. Исследовать форму ФМ-сигналов при скачках фазы  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $270^\circ$ .
6. Измерить частоты и амплитуды спектральных компонентов модулированных и информационного сигналов с параметрами, указанными в п.3.
7. Исследовать изменение вида и параметров модулированных сигналов и их спектральных компонентов в зависимости от параметров модуляции, в частности, при  $\alpha = 4, 6, 8$  и при увеличении скорости манипуляции в 2 раза, а также при увеличении несущей при АМ и средней при ЧМ вдвое.
8. Сделать выводы по результатам исследований.

#### **Методические указания.**

4.1. В качестве генератора несущих колебаний следует использовать генератор синусоидальных сигналов, а в качестве модулирующий сигналов – генератор прямоугольных импульсов.

4.2. Вид сигнала устанавливается путем задания ширины импульсов.

4.3. При использовании анализатора спектра разрешение по частоте следует устанавливать в зависимости от разности частот между гармониками, так, чтобы их можно различить на спектрограмме. Наиболее приемлемое значение разрешения по частоте находится в пределах от 1 до 10 Гц. Максимальную частоту целесообразно устанавливать так, чтобы исследуемый спектр занимал около 80% экрана.

4.4. Запуск работы анализатора спектра и частотных характеристик осуществляется путем нажатия на клавиатуре компьютера клавиши пробел.

## **5. Содержание отчета**

- 5.1 Цель и программа работы.
- 5.2 Структурная схема экспериментальной установки.
- 5.3 Расчет и графики спектральных характеристик сигналов, выполненные в процессе домашней подготовки для индивидуального варианта, указанного в программе исследований.
- 5.4 Осциллограммы и спектрограммы исследуемых сигналов.
- 5.5 Выводы по результатам исследований.

## **6. Контрольные вопросы**

- 6.1 Изобразите форму немодулированных и модулированных сигналов передачи данных и назовите временные параметры сигналов.
- 6.2 В каких единицах измеряется скорость передачи сигналов и скорость передачи информации? Как они соотносятся друг с другом?
- 6.3 Изобразите спектр периодической последовательности видеоимпульсов различной скважности?
- 6.4 На каких частотах будут спектральные компоненты периодической последовательности прямоугольных импульсов вида 1:5, передаваемой со скоростью 64 кБод?
- 6.5 Охарактеризуйте закономерности спектров одиночных импульсов различной формы.
- 6.6 Охарактеризуйте закономерности спектров периодических немодулированных и модулированных сигналов.
- 6.7 Рассчитайте спектры модулированных АМ- и ФМ-сигналов при заданной скорости манипуляции, несущей частоте и виде импульсной последовательности.
- 6.8 Объясните особенности спектров при частотной модуляции сигналов.
- 6.9 В чем состоит особенность спектров модулированных сигналов при низкой несущей частоте по отношению к модулирующей?
- 6.10 Почему нельзя передавать немодулированные сигналы данных по каналам связи?
- 6.11 Какова связь ширины пропускания линии (канала) связи и скоростью передачи сигналов?