

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное бюджетное государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования

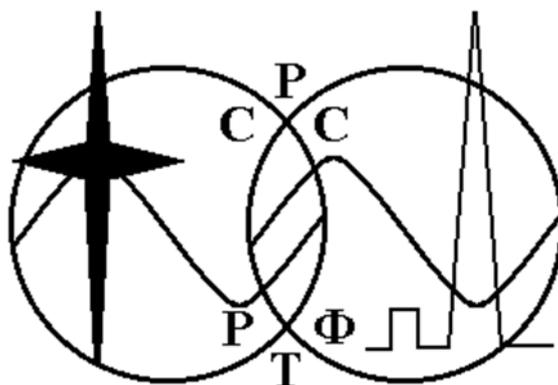
**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра средств радиосвязи**

**МЕЛИХОВ С.В., НЕНАХОВ А.В.**

**ДИСКРЕТИЗАЦИЯ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА В ЦИФРОВЫХ  
СИСТЕМАХ СВЯЗИ**

Учебно-методическое пособие по лабораторной работе в компьютерной среде Design Center (PSpice) по дисциплинам «Радиовещание, связь и электроакустика», «Радиовещание и электроакустика», «Системы радиовещания» для студентов радиотехнических специальностей



Томск – 2012

Мелихов С.В., Ненахов А.В. Дискретизация аналогового сигнала в цифровых системах связи. Учебно-методическое пособие по лабораторной работе в компьютерной среде Design Center (PSpice) по дисциплинам «Радиовещание, связь и электроакустика», «Радиовещание и электроакустика», «Системы радиовещания» для студентов радиотехнических специальностей. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. 2012. – 12 с.

Приводятся краткие теоретические сведения и аналитические выражения, необходимые для исследования влияния параметров дискретизации на энергетические характеристики передаваемого сообщения по радиоканалу. Представлена методика проведения экспериментального исследования на основе использования компьютерной среды Design Center (PSpice).

© Мелихов С.В., Ненахов А.В.. 2012

© Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012

### Цель работы:

изучение принципа дискретизации аналогового сигнала и исследование особенностей спектра сигнала с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ);

приобретение навыков работы с пакетом программ автоматизированного проектирования Design Center (PSpice).

## 1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Дискретизация аналогового сигнала  $S_{ex}(t)$  осуществляется в амплитудно-импульсном модуляторе (АИ - модулятор, рисунок 1) при помощи тактовой последовательности импульсов дискретизации  $S_{ud}(t)$  с длительностью импульсов  $\tau_\Delta$  и периодом повторения  $T_\Delta$ . Выходной сигнал АИ - модулятора (АИМ - сигнал) является *дискретным сигналом* и представляет собой последовательность отсчетов сигнала  $S_{АИМ}(t)$ , отстоящих один от другого на интервал времени  $T_\Delta$ . Из теоремы В.А. Котельникова известно, что частота дискретизации  $F_\Delta = 1 / T_\Delta$  должна удовлетворять условию:  $F_\Delta \geq 2 F_\epsilon$ , где  $F_\epsilon$  – верхняя частота спектра сигнала  $S_{ex}(t)$ .



Рисунок 1 - Структурная схема устройства для дискретизации аналогового сигнала; ГИД - генератор импульсов дискретизации

Операция дискретизации в АИ - модуляторе эквивалентна произведению двух сигналов:

$$S_{АИМ}(t) = S_{ex}(t) S_{ud}(t). \quad (1)$$

Последовательность тактовых импульсов дискретизации, имеющих *единичную амплитуду*, представляется рядом Фурье:

$$S_{ud}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G_k \exp(jk\omega_\Delta t) = \left( \frac{\tau_\Delta}{T_\Delta} \right) \left[ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k\omega_\Delta t) \right], \quad (2)$$

где 
$$C_k = [2 \sin(k\pi\tau_\Delta / T_\Delta)] / (k\pi\tau_\Delta / T_\Delta). \quad (3)$$

Из (2) следует, что спектр импульсов дискретизации содержит компонент с нулевой частотой  $(\tau_\Delta / T_\Delta)$  и высокочастотные компоненты

$(\tau_\Delta / T_\Delta) \sum_{k=1}^{\infty} \{C_k \cos(k2\pi F_\Delta t)\}$  с частотами, кратными частоте дискретизации

( $k F_{\partial} = k / T_{\partial}$ , рисунок 2).

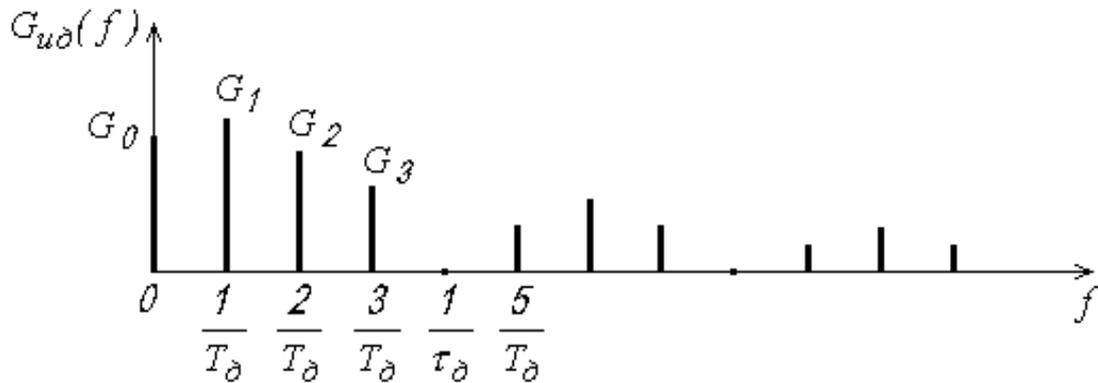


Рисунок 2 – Спектр импульсов дискретизации при  $T_{\partial} = 4 \tau_{\partial}$

При **однополярном** **однотоновом** **входном** **сигнале**  $S_{ex}(t) = U_{ex}[1 + m \cos(\Omega t)]$  с частотой  $\Omega = 2\pi F$ , уровнем громкости  $m$  и спектром в виде двух спектральных составляющих (рисунок 3,а), АИМ - сигнал также **однополярен** (рисунок 4), и на основе (1) и (2) может быть представлен выражением:

$$S_{АИМ}(t) = U_{ex}[1 + m \cos(\Omega t)] \left( \frac{\tau_{\partial}}{T_{\partial}} \right) \left[ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k \omega_{\partial} t) \right] =$$

$$= U_{ex} \left( \frac{\tau_{\partial}}{T_{\partial}} \right) \left\{ 1 + m \cos(\Omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \{ C_k \cos(k \omega_{\partial} t) + (m C_k / 2) \cos[(k \omega_{\partial} \pm \Omega) t] \} \right\}. \quad (4)$$

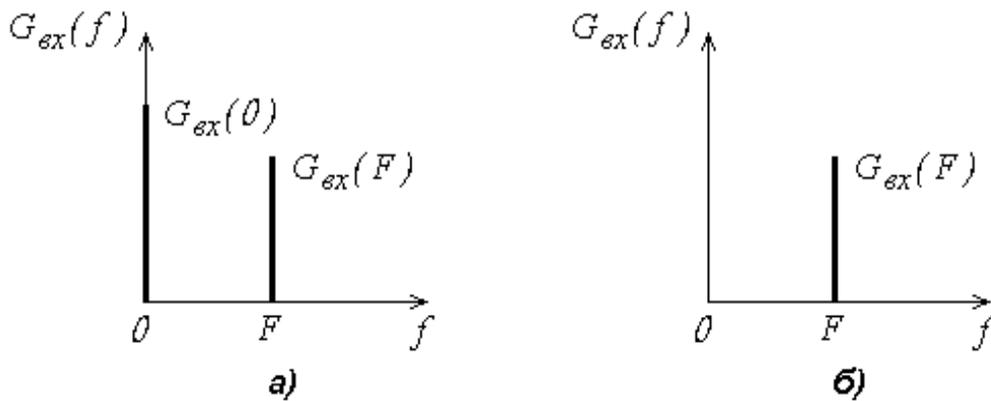


Рисунок 3 – Спектр **однополярного** входного сигнала АИ - модулятора (а); спектр **двухполярного** входного сигнала АИ - модулятора (б)

Из (4) следует, что спектр **однополярного** АИМ - сигнала содержит: компонент с **нулевой частотой**  $U_{ex}(\tau_{\partial} / T_{\partial})$ ; **низкочастотный** компонент  $U_{ex}(\tau_{\partial} / T_{\partial}) m \cos(\Omega t)$ ; **высокочастотные** компоненты, состоящие из гармоник частоты дискретизации  $U_{ex}(\tau_{\partial} / T_{\partial}) \sum_{k=1}^{\infty} \{ C_k \cos(k 2\pi F_{\partial} t) \}$ ; **высокочастотные** компоненты **боковых спектральных составляющих**

$U_{ex}(\tau_\partial / T_\partial) \sum_{k=1}^{\infty} \{(m C_k / 2) \cos [2 \pi (k F_\partial \pm F) t]\}$ , расположенные вокруг гармоник частоты дискретизации (рисунок 6,а).

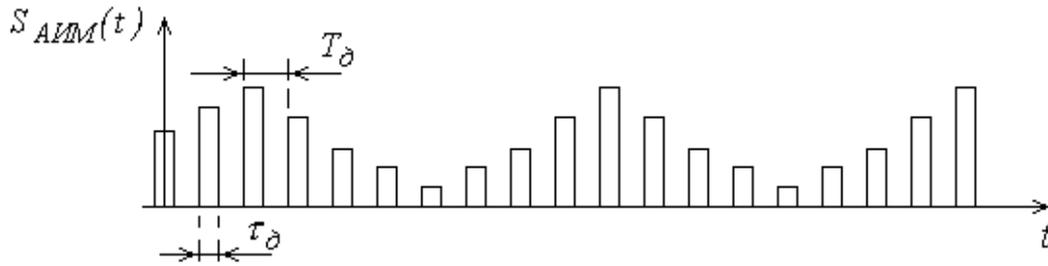


Рисунок 4 – Однополярный АИМ - сигнал

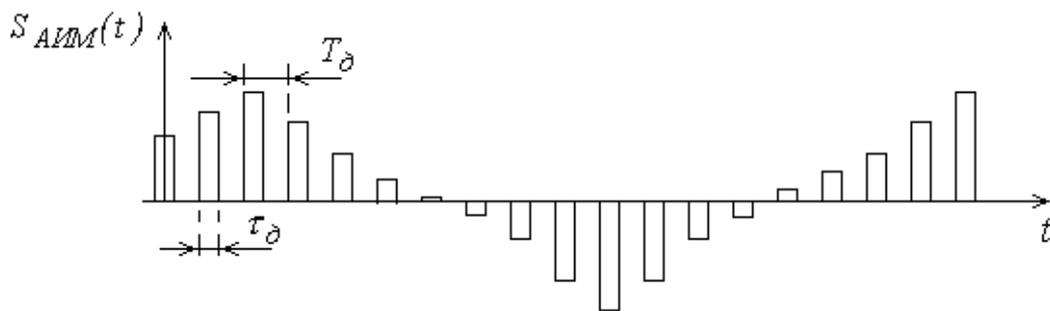


Рисунок 5 – Двухполярный АИМ - сигнал

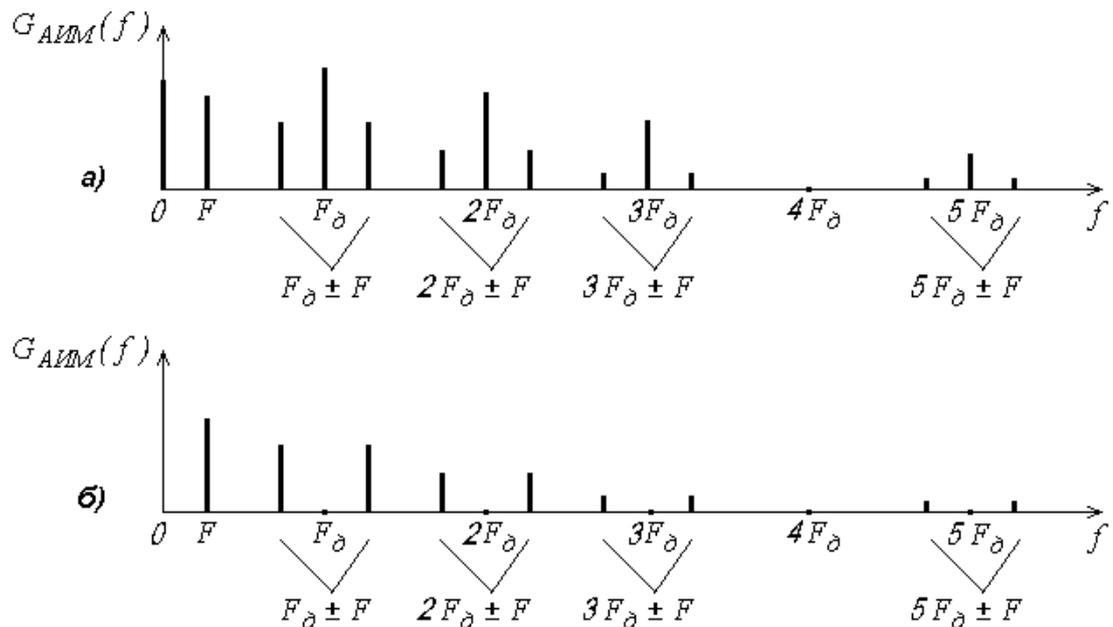


Рисунок 6 – Спектр однополярного АИМ - сигнала (а);  
спектр двухполярного АИМ - сигнала (б)

При двухполярном входном сигнале  $S_{ex}(t) = m U_{ex} \cos(\Omega t)$  (его спектр содержит одну спектральную составляющую, рисунок 3,б) АИМ - сигнал будет также

двухполярным (рисунок 5). На основе (1) и (2) двухполярный АИМ - сигнал представляется в виде:

$$S_{АИМ}(t) = [m U_{ex} \cos(\Omega t)] \left( \frac{\tau_{\partial}}{T_{\partial}} \right) \left[ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos(k \omega_{\partial} t) \right] =$$

$$= U_{ex} \left( \frac{\tau_{\partial}}{T_{\partial}} \right) \left\{ m \cos(\Omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} \{ (m C_k / 2) \cos[(k \omega_{\partial} \pm \Omega) t] \} \right\}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что двухполярный АИМ - сигнал отличается от однополярного тем, что его спектр не содержит компонента с нулевой частотой, компонентов с частотами, кратными частоте дискретизации, а содержит только низкочастотный компонент  $U_{ex} (\tau_{\partial} / T_{\partial}) m \cos(\Omega t)$  и высокочастотные компоненты  $U_{ex} (\tau_{\partial} / T_{\partial}) \sum_{k=1}^{\infty} \{ (m C_k / 2) \cos[(k \omega_{\partial} \pm \Omega) t] \}$  (рисунок 6, б).

Для выделения частоты дискретизации из АИМ - сигнала в приемнике необходимо, чтобы спектральная составляющая с частотой  $F_{\partial}$  АИМ - сигнала была как можно больше. Ее величина зависит от скважности импульсов дискретизации ( $Q = T_{\partial} / \tau_{\partial}$ ). Величину  $Q$ , соответствующую максимуму спектральной составляющей с частотой  $F_{\partial}$  однополярного АИМ - сигнала, можно найти с использованием выражения (3) при  $k=1$ :

$$\frac{\partial C_1}{\partial Q} = \frac{\partial \{ [2 \sin(k\pi / Q)] / (k\pi / Q) \}}{\partial Q} = 0. \quad (6)$$

Нетрудно убедиться, что равенство (6) справедливо при  $Q = 2$ .

Демодуляция АИМ - сигнала возможна с помощью ФНЧ, имеющего частоту среза  $F_g$ . Искажения при демодуляции будут тем меньше, чем больше затухание фильтра для полос  $k F_{\partial} \pm F$  ( $k=1, 2, \dots$ ), наиболее опасной из которых является нижняя боковая  $F_{\partial} - F$ . Поэтому на практике обычно принимают  $F_{\partial} = (2, 3 \dots 2, 5) F_g$ . Например, в цифровой телефонии при дискретизации аналогового телефонного сигнала с  $F_g = 3,4 \text{ кГц}$  частота дискретизации выбрана равной  $8 \text{ кГц}$ , что соответствует условию  $F_{\partial} = 2,35 F_g$ .

Достоинством АИМ - сигнала является то, что при использовании многоканальной АИ - модуляции появляется возможность передачи по одному каналу связи сообщений от нескольких абонентов. Однако, чем большее количество абонентов будут использовать канал связи, тем меньший уровень будет иметь демодулированный сигнал, так как длительность импульсов дискретизации обратно пропорциональна количеству абонентов. Поэтому количество абонентов в одном канале ограничено, и это недостаток АИ - модуляции.

Другим недостатком АИ - модуляции являются жесткие требования к параметрам канала передачи, поскольку шумы и помехи канала передачи накладываются на

модулированные импульсы и изменяют их форму. Искажения формы импульсов приводят к появлению шумов и помех на выходе канала. Помехи и шумы значительно увеличиваются при передаче АИМ - сигналов на большие расстояния при помощи ретрансляторов, поскольку искажения импульсов на отдельных участках складываются.

Существенное уменьшение действия шумов и помех канала передачи достигается при использовании *цифровых сигналов*, допускающих возможность применения регенерирующих устройств. *Регенерация цифрового сигнала* заключается в восстановлении искаженной формы импульсов до первоначального вида и может быть проведена многократно (в каждом ретрансляторе). Регенерация цифрового сигнала практически полностью исключает действие шумов и помех канала передачи. Цифровой сигнал получают из дискретного (например, из АИМ - сигнала) при помощи кодера, включающего в себя устройство квантования сигнала по уровню и устройства кодирования получаемого многоуровневого дискретного сигнала.

## **2 ОПИСАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПАКЕТА PSpice**

Составляющие пакета Design Center (PSpice), используемые при проведении лабораторной работы:

Schematics – графический редактор принципиальных схем, который одновременно является управляющей оболочкой для запуска основных модулей системы на всех стадиях выполнения работы. Редактор запускается открытием файла Wpsched;

PSpice – программа моделирования аналоговых устройств. Программа запускается из графического редактора путем выполнения команды Analysis\Run Pspice или по нажатию клавиши F11 при работающем графическом редакторе;

Probe – программа графического отображения, обработки и документирования результатов моделирования. Программа запускается автоматически по завершению моделирования устройства программой Pspice.

Пакет начинает работу при запуске графического редактора Schematics.

## **3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА**

Лабораторный макет находится в файле discrete.sch и представляет собой систему дискретизации и восстановления сигнала. Схема макета приведена на рисунке 7.

Генератор гармонических сигналов V1 предназначен для получения синусоидального сигнала частотами 300, 1500 и 3400 Гц. Частота изменяется в процессе выполнения работы.

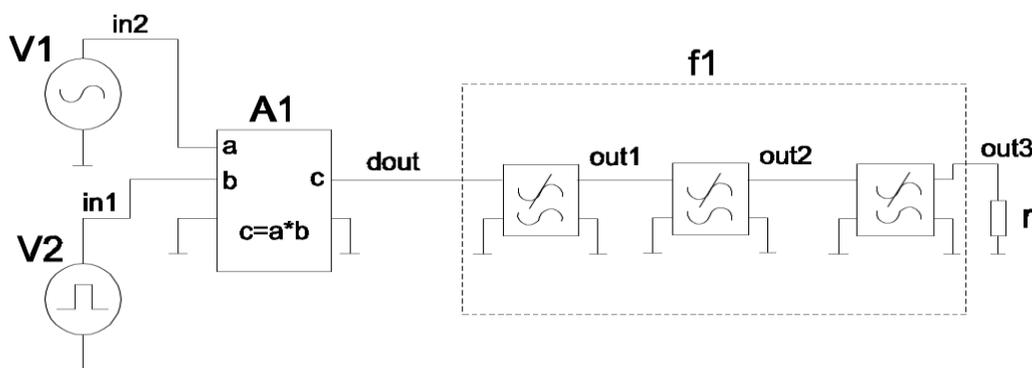


Рисунок 7- Функциональная схема лабораторного макета

Генератор прямоугольных импульсов V2 необходим для получения импульсов дискретизации с периодом

$$T_{\partial} = 1 / F_{\partial} = 1 / 8 \cdot 10^3 \text{ Гц} = 125 \cdot 10^{-6} \text{ с} \quad (7)$$

и скважностью  $Q=4$ . Такая скважность дает наиболее наглядную спектральную картину. Длительность, период и амплитуда импульсов дискретизации могут изменяться.

Модулятор A1 необходим для осуществления дискретизации путем перемножения входных сигналов (аналогового сигнала и импульсов дискретизации).

ФНЧ f1 представляет собой фильтр Чебышева шестого порядка и необходим для выделения из спектра дискретного АИМ - сигнала спектральной составляющей исходного однотонового аналогового сигнала. Частота среза фильтра -  $3,4 \text{ кГц}$ , неравномерность частотной характеристики в полосе пропускания -  $0,5 \text{ дБ}$ , крутизна спада АЧХ -  $53 \text{ дБ / на октаву}$ .

Узлы на схеме обозначены соответственно их обозначению на макете.

#### 4 РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ

4.1 Для последовательности тактовых импульсов дискретизации с единичной амплитудой рассчитать зависимость уровня компонента спектра с частотой дискретизации ( $F_{\partial}$ ) от скважности. Скважность импульсов дискретизации принять равной  $Q=1,5; 2; 3$ .

Пояснить ход рассчитанной зависимости.

4.2 Для однополярного и двухполярного АИМ - сигналов рассчитать зависимости уровня низкочастотного компонента спектра (с частотой  $F$ ) от скважности импульсов дискретизации при  $Q=1,5; 2; 3$ .

Пояснить ход рассчитанных зависимостей.

## **5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

5.1 Ознакомиться с описанием лабораторной работы, изучить состав и назначение программ пакета PSpice (Design Center), уяснить функциональное назначение отдельных узлов макета.

5.2 Запустить пакет PSpice (Design Center) и открыть файл с лабораторным макетом discrete.sch.

5.3 Исследовать зависимости уровней компонентов спектров импульсов дискретизации (с единичной амплитудой) от скважности импульсов дискретизации при  $Q=1,5; 2; 3$ . Выяснить, как выглядит огибающая компонентов спектров и как меняется количество компонентов в одном лепестке спектров при изменении скважности. Обратить особое внимание на изменение интенсивности компонента с частотой дискретизации  $F_{\delta}$ .

5.4 Для однополярного АИМ - сигнала и для двухполярного АИМ - сигнала исследовать зависимости уровней низкочастотного компонента спектра (с частотой  $F$ ) и компонента с частотой дискретизации ( $F_{\delta}$ ) от скважности импульсов дискретизации при  $Q=1,5; 2; 3$  и частотах аналогового сигнала  $300 \text{ Гц}$  и  $3400 \text{ Гц}$ .

5.5 При частоте аналогового сигнала  $3400 \text{ Гц}$  и оптимальной величине скважности импульсов дискретизации сравнить восстанавливаемый сигнал и его спектр в следующих точках схемы ФНЧ:

- на выходе третьего каскада ФНЧ;
- на выходе второго каскада ФНЧ;
- на выходе первого каскада ФНЧ.

Пояснить наличие или отсутствие искажений восстанавливаемого сигнала в указанных точках схемы ФНЧ.

5.6 Сделать выводы по проделанной работе.

## **6 ПОЯСНЕНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ**

6.1 Для открытия пакета PSpice необходимо запустить графический редактор Wpsched (schematics). Лабораторный макет находится в файле discrete.sch, который открывается выполнением команды file\open.

6.2 Для исследования зависимости уровня спектральных составляющих импульсов дискретизации от их скважности после открытия файла с макетом необходимо отключить генератор аналогового сигнала. Для этого двойным нажатием левой кнопки мыши по символу генератора аналогового сигнала V4 необходимо вызывать меню параметров генератора, в графе vAMPL (уровень переменной составляющей) и

freq (частота сигнала) установить нулевое значение, а в графе voff (уровень постоянной составляющей) установить единицу. Скважность изменяется путем изменения длительности импульса дискретизации. Для этого двойным нажатием левой кнопки мыши по символу генератора импульсных сигналов V3 необходимо вызвать меню параметров генератора. В графе pw указывается длительность импульса. Для запуска программы расчета процессов, протекающих в схеме – PSpice – необходимо выполнить команду analysis\Run PSpice или нажать клавишу F11. По завершению моделирования, о чем можно судить по короткому звуковому сигналу, запустится программа, предназначенная для графического отображения процессов, протекающих в заданных точках – Probe. Для просмотра сигнала на выходе дискретизатора необходимо выполнить команду в Probe Trase\add. В меню из списка узлов необходимо выбрать узел dout. На экране Probe появится изображение сигнала.

Примечание. На схеме макета обозначены узлы:

In1 – импульсы дискретизации;

In2 – аналоговый сигнал;

Dout – дискретный сигнал;

Out1 – восстановленный сигнал при прохождении первого каскада фильтра;

Out2 – восстановленный сигнал при прохождении первых двух каскадов фильтра;

Out3 - восстановленный сигнал при прохождении всего фильтра.

Для исследования спектра необходимо выполнить команду axis\fourier.

Вернуться к нормальному изображению сигнала возможно выполнив эту команду повторно. Для более детального исследования спектра или сигнала необходимо выполнить команду zoom\display pointer. Затем мышью необходимо выделить интересующий участок сигнала и выполнить команду zoom\area. Вернуть нормальное изображение сигнала или спектра возможно командой zoom\normal. Не забудьте отключить функцию выделения участка сигнала или спектра командой zoom\display pointer. Изменить диапазон осей можно командой axis\set range. При этом появится запрос на изменение параметров по осям. Изменение требует введения двух чисел через пробел, например, при необходимости детального просмотра диапазона от 0 до 5 миллисекунд необходимо ввести "0 5ms". По умолчанию параметры изменены не будут.

Примечание. В пакете PSpice приняты следующие обозначения порядка:

Гига – G;

Мега – М;  
 Кило – К или k;  
 Милли – m;  
 Микро – u;  
 Нано – n.

Для точного определения уровня сигнала и значения частоты или времени в заданной точке удобно пользоваться дисплейным курсором, вызвав его командой `cursor\display`. В окне курсора будут три строки и три столбца. Первый столбец – название курсора. C1 – курсор, управляемый левой кнопкой мыши, C2 – курсор, управляемый правой кнопкой мыши, dif – разница между показаниями курсоров. Вторым столбец – показание по оси X, третий столбец – по оси Y. Курсор отключается повторным выполнением команды `cursor\display`.

6.3 Для исследования зависимости уровня низкочастотного компонента однополярного и двухполярного АИМ сигнала от скважности необходимо подключить генератор непрерывного аналогового сигнала и установить частоту сигнала равной  $300 \text{ Гц}$ . Для этого в меню параметров генератора, в строке `vamp1` и `voff` нужно установить значение  $0,5 \text{ В}$ , а в строке `freq` - значение 300. Получить двухполярный сигнал можно путем обнуления параметра `voff` этого источника.

6.4 Для сравнения восстановленного сигнала при прохождении одного двух и трех каскадов фильтра, в Probe вызываются одновременно три узла – `out1`, `out2` и `out3`. Выделив один из них (они обозначены в нижнем левом углу экрана) и нажав клавишу `del`, график напряжения в узле можно удалить.

## **7 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как по виду спектра АИМ - сигнала можно определить скважность импульсов дискретизации ?
2. Чем отличается спектр однополярного АИМ - сигнала от спектра двухполярного АИМ - сигнала ?
3. Почему возникают проблемы восстановления сигналов при частоте дискретизации равной двум верхним частотам дискретизируемого сигнала или немногим более этого значения ?
4. Чем определяется уровень низкочастотного компонента спектра АИМ - сигнала ?
5. Как можно демодулировать дискретизированный сигнал ?
6. Чем определяется завершение моделирования схемы ?
7. Как можно рассмотреть более точно тот или иной участок сигнала или спектра в Probe ?

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice) – М.: СК ПРЕСС, 1996. - 272 с.
2. Системы радиосвязи / Под. ред. Н.И. Калашникова. – М.: Радио и связь, 1998. - 352 с.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники, том 1. – М.: Мир, 1993. - 399 с.
4. Мелихов С.В., Титов А.А.. Радиовещание, связь и электроакустика: Учебно-методическое пособие по практическим занятиям для студентов радиотехнических специальностей. - Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2000. - 49 с.