

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО СВЯЗИ**  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**Московский технический университет связи и информатики**

---

**Лабораторная работа № 10**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ И  
ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**  
(компьютерное моделирование)

Москва, 2013

План УМД 2012/2013 уч.г.

Лабораторная работа № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ И  
ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
(компьютерное моделирование)

Составитель: канд.техн.наук, проф. В.В.Логвинов

Издание утверждено советом факультета РиТ. Протокол № от 16.05.2013 г.

Рецензент: Г.А.Долин, канд.техн.наук., доцент

## 1 Цель работы

Исследование свойств цифро-аналоговых (ЦАП) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП) сигнала с применением математических моделей узлов в системе схемотехнического моделирования MC10 и устройств на их основе.

## 2 Задание по расчетной части

2.1 Рассчитайте среднеквадратичную ошибку квантования для ширины диапазона изменения напряжения (рис.10.14) и 8-ми и 12-ти разрядного АЦП.

2.2 Определите среднюю мощность шума квантования и отношения сигнал/шум по мощности (напряжению) для указанной в п.2.1 значения разрядности АЦП.

Примечание: вариант задания может задаваться преподавателем

## 3 Задание на компьютерное моделирование

3.1 Произвести исследование свойств ЦАП и АЦП с использованием математических моделей устройств при воздействии на входе АЦП гармонического сигнала при дискретизации последовательностью импульсов типа меандр для различного значения частоты дискретизации (44 кГц, 96 кГц и 192 кГц). Получить спектр выходного напряжения.

3.2 Исследовать свойства ЦАП и АЦП при дискретизации аналогового сигнала меандром для различной разрядности преобразователей (8, 12 и 16) для частоты дискретизации 96 кГц.

3.3 Исследовать влияние формы сигнала дискретизации (меандр, узкий импульс) и разрядности (8, 12, 16) ЦАП и АЦП на величину ошибки дискретизации для частоты дискретизации 192 кГц.

## 4 Методические указания по выполнению работы

### Сборка исследуемой схемы

Перед выполнением п.3.1 лабораторной работы следует загрузить систему схемотехнического проектирования MC10 и вызвать в главное окно структуру, объединяющую АЦП и ЦАП 16-го разряда, находящегося в файле VADC16DAC.CIR.

Для этого необходимо выбрать режим File (рис.10.1)

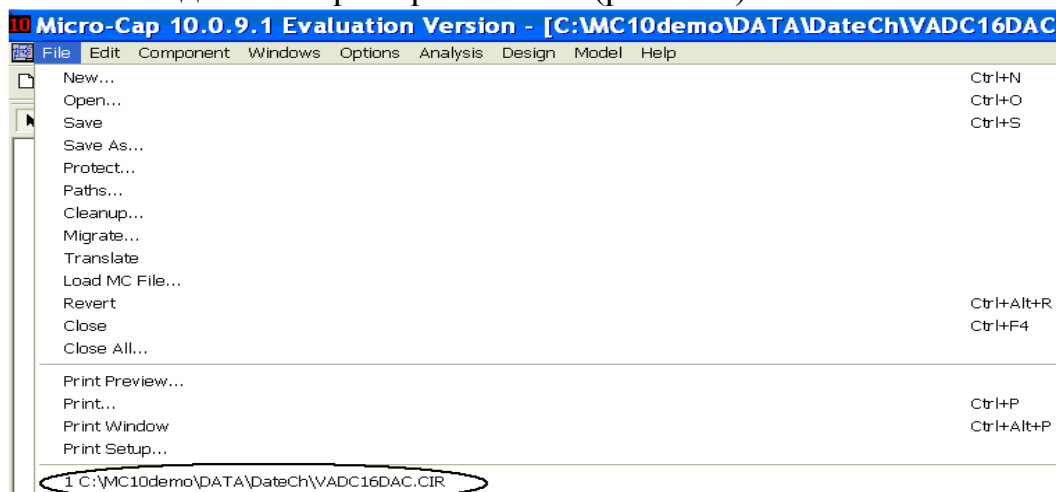


Рис.10.1

и на выпадающей закладке C:\MC10demo\DATA\DataCh\VADC16DAC.CIR, вызвав его в окно схем.

При отсутствии требуемого файла на закладке, необходимо его отыскать в папке DATA, выполнив последовательно:

На строке инструментов пиктограмму с изображением папки , в диалоговом окне (рис.10.2) отыскать папку и именем DataCh и открыть ее.

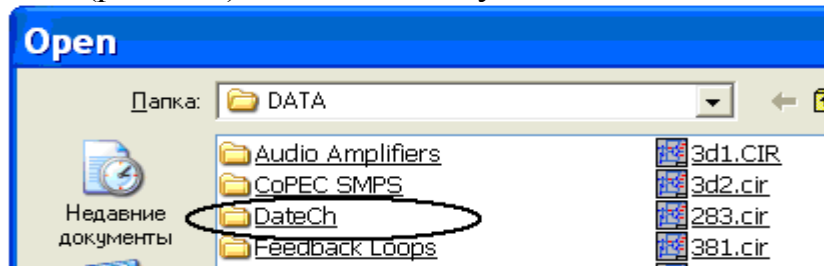


Рис.10.2

Отыскав файл лабораторной работы, открыть его, загрузив в главное окно, схему лабораторной работы № 10 VADC16DAC (рис.10.3)

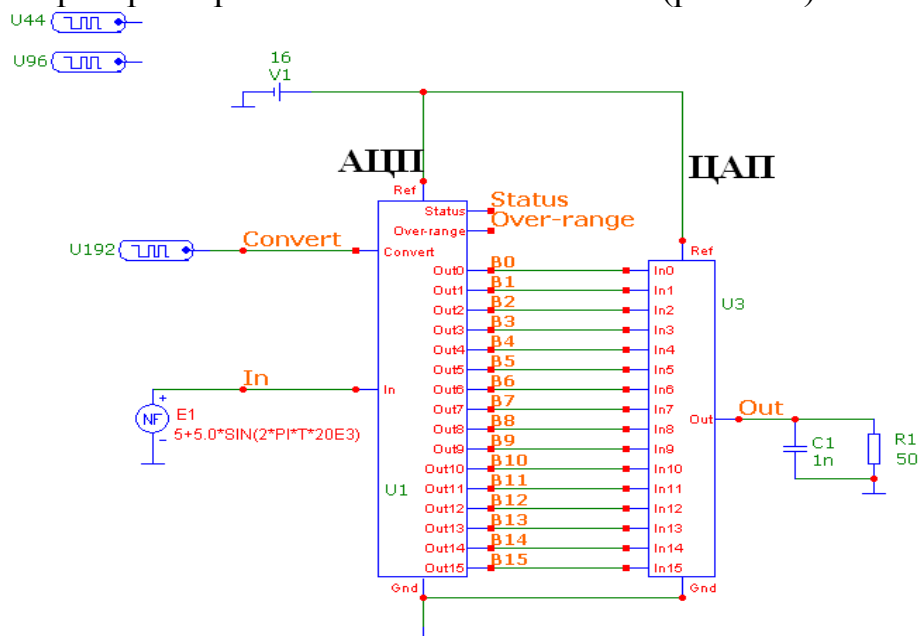


Рис.10.3

При отсутствии такого файла в папке DataCh схему лабораторной работы необходимо ввести самостоятельно. Целесообразно сборку схемы, содержащей АЦП и ЦАП, начать с загрузки в окно схем модель АЦП, последовательно выполнив: Component→ Digital Primitives→AtoD Converters→AtoD16 (рис.10.4, выбрав 16-разрядый АЦП)

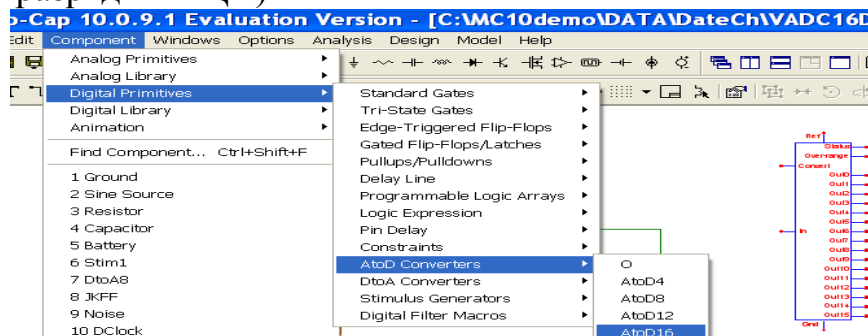


Рис.10.4

Изображение АЦП размещается примерно в середине окна схем, нажав левую кнопку мыши. Затем на выпадающем подменю AtoD:16-bit AtoD Converter (рис.10.5) вводят параметры модели

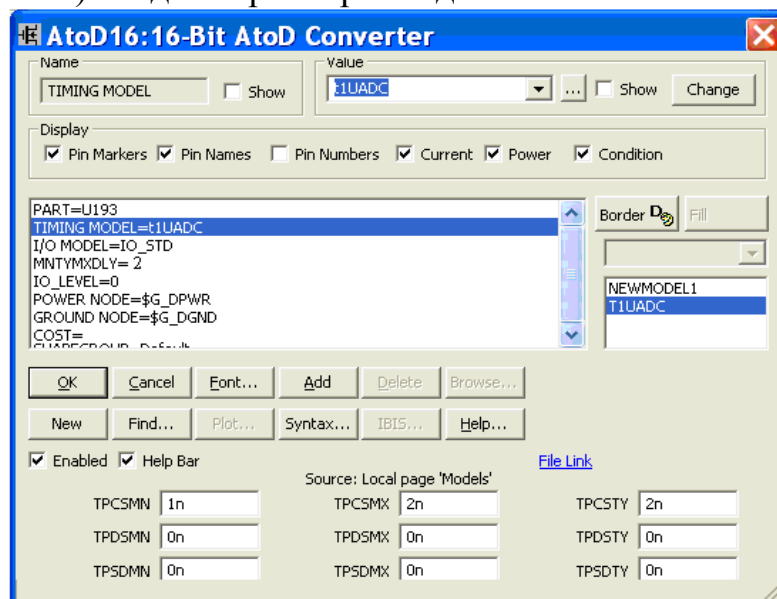


Рис.10.5

В верхней части подменю (в рамках Name и Value) дублируется описание атрибутов модели ADC, приводимое в окне параметров.

Активные кнопки в рамке Display позволяют:

Pin Markers – квадратиком помечать выводы, к которым подключаются цифровые

устройства, точкой – аналоговые;

Pin Names – присваивать выводам номера;

Pin Numbers - нумеровать выводы ADC и отображать в окне схем значения токов, мощности и условий анализа.

В окне параметров указывается:

атрибут компонента:

PART (NAME) и, присвоенное ему имя (U193 – имя компонента, начинающееся всегда с буквы «U»);

TIMING MODEL и, присвоенное ему имя (t1UADC),

где t1UADC – имя модели, применяемое для анализа во временной области;

I/O MODEL = IO STD – модель (стандартная STD), описывающая интерфейс ввода/вывода;

MNTYMXDLY = 2 – глобальный атрибут модели, определяющий условия анализа с точки зрения временных задержек:

0 - отсутствие задержки;

1 - минимальная задержка ;

2 - типичная задержка;

3 - максимальная задержка;

4 - наихудший случай.

Кнопки подменю AtoD:16-bit AtoD Converter выполняют традиционное назначение.

Source:Local page “Models”

TPCSMN – минимальное (в секундах) время, определяющее временной интервал от начала процесса нарастания до установившегося значения;

TPCSMX – максимальное значение времени (с) процесса нарастания;

TPCSTY – типичное значение времени (с) нарастания импульса;

остальные атрибуты можно выбирать по умолчанию или, учитывая рекомендации файла Help.

Аналогичным образом задают параметры ЦАП (рис.10.6)

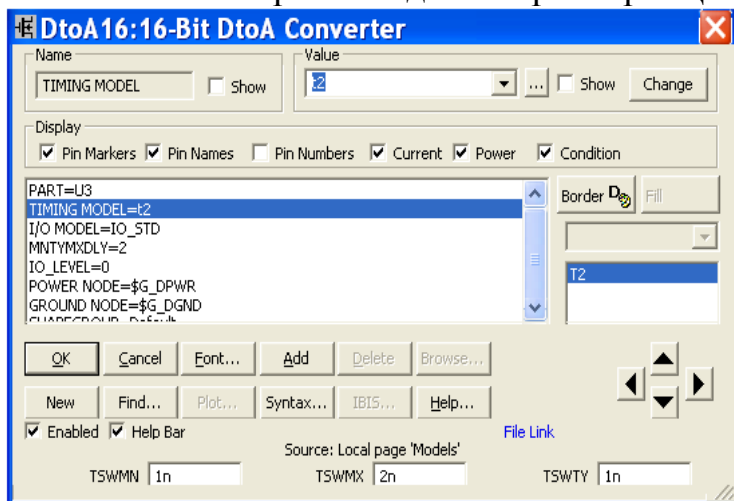


Рис.10.6

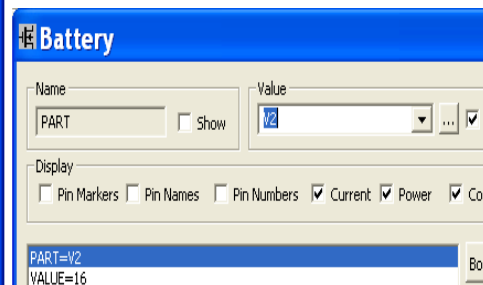



Рис.10.7

После соединения соответствующих выводов АЦП и ЦАП

В качестве источника питания (опорное напряжение для ЦАП) применяется

источник ЭДС, выбирая УГО источника  на строке компонентов окна схем (рис.10.4) и в подменю Battery (рис.10.7) задавая атрибут Value =16 (В).

На цифровой вход АЦП (Convert) включается модель цифрового источника с одним выходом (Stim1), устанавливаемого в схему последовательным выполнением операций: Component→Digital Primitives →Stimulus Generators→Stim1, параметры которого задаются в подменю Stim1:1-Bit Digital Stimulus (рис.10.8) в атрибуте Command директивой .define.

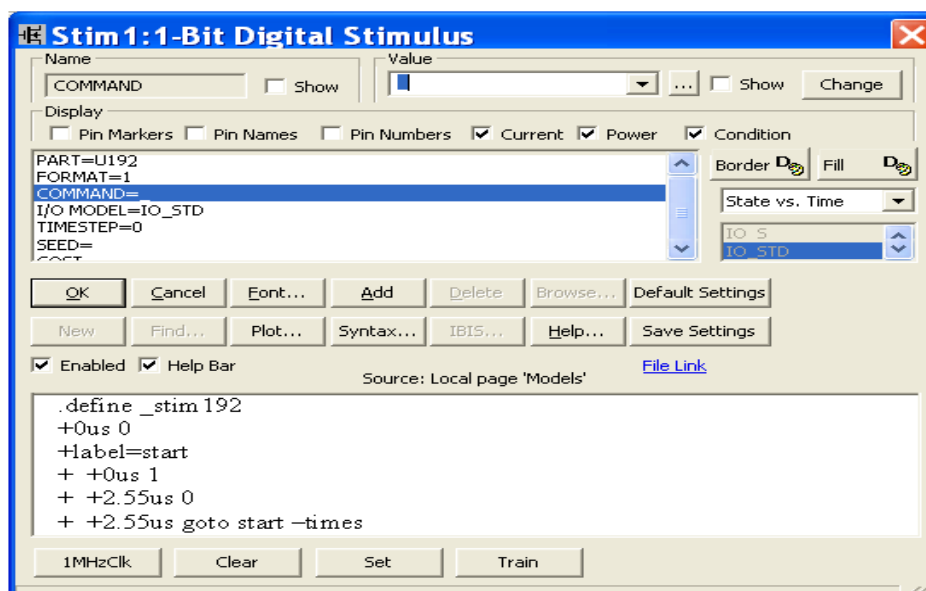


Рис.10.8

Генератору присвоено имя Stim 192, указывающее на формирование логической импульсной последовательности с частотой 192 кГц.

Напряжение, подвергающееся дискретизации и последующему восстановлению из цифровой последовательности, создается функциональным источником ЭДС, (после выполнения команд Component→Analog Primitives→Function Sources→NFV) задание параметров которого осуществляется в подменю: NFV:Analog behavioral voltage source (рис.10.9)

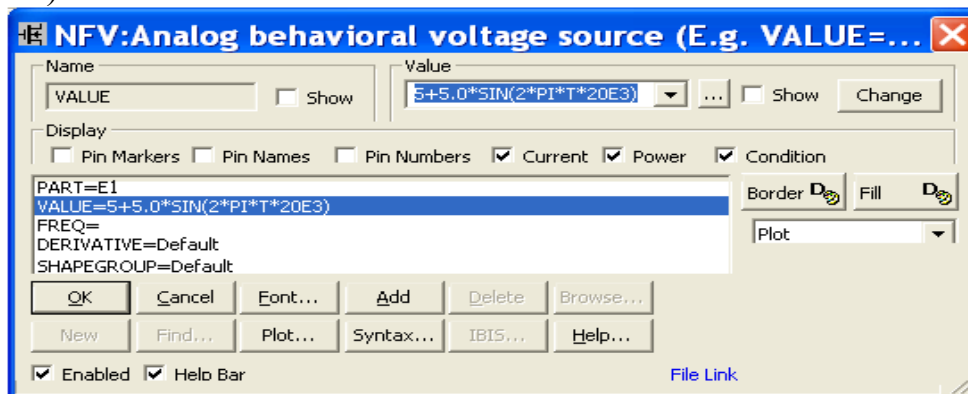


Рис.10.9

Функциональный источник ЭДС может зависеть от времени, токов в цепях и напряжений в узлах схемы. Используемый в моделировании преобразователей напряжения аналоговый сигнал обладает постоянной составляющей ( 5В) и формирует гармонический сигнал с амплитудой 5 В и частотой 20 кГц (соответствует граничной частоте слышимости звуковых колебаний человеком). Аналитическое выражение, описывающее входной сигнал и УГО генератора, приведены на рис.10.3, 10.9.

Завершает ввод исследуемой схемы подключение аналоговой «земли» и фильтра на выходе ЦАП. Методика сходна с вводом батареи, а при вводе

конденсатора (резистора) необходимо, войдя в подменю Capacitor (Resistor) достаточно ограничиться (рис.10.10)

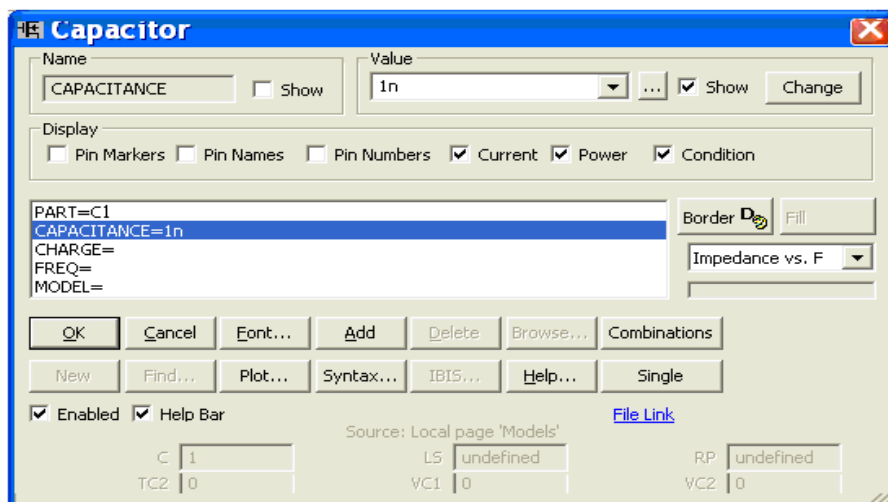


Рис.10.10

вводом атрибута CAPACITANCE = 1n (значение емкости конденсатора, равное 1 нФ), поскольку значение атрибута PART соответствует очередному порядковому номеру конденсатора и автоматически присваивается программой. Другие атрибуты могут использоваться при описании более сложной модели конденсатора, учитывающей, например, изменение емкости от частоты входного сигнала, стоимости изделия, рассеиваемой мощности и др.

#### 4.1 Влияние частоты дискретизации на свойства преобразователей

Для проведения моделирования последовательного включения АЦП и ЦАП при различной частоте дискретизации на вход собранной схемы (рис.10.3) подключаются источники цифровой последовательности с частотой следования  $f_d = 44,1$  кГц (stim44),  $f_d = 96$  кГц (stim96) и  $f_d = 192$  кГц. Чтобы упростить проведение эксперимента процедура, рассмотренная при вводе параметров генератора stim192, повторяется для новых значений длительности формируемого импульса (рис.10.11, 10. 12). При задании параметров генератора с прямоугольной формой импульса и скважностью равной двум (меандр) с частотой 44,1 кГц используется подменю генератора U44 (рис.10.11)



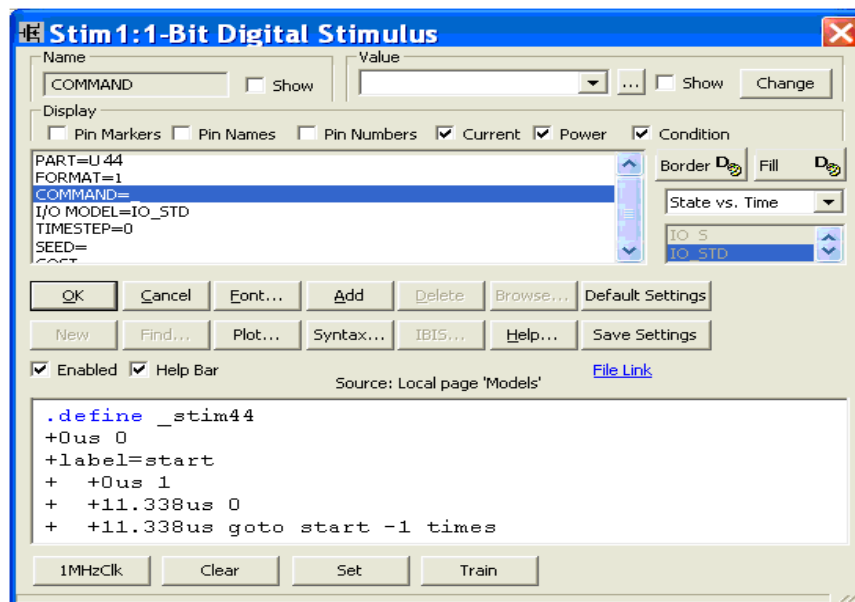


Рис.10.11

Для задания параметров прямоугольной последовательности с частотой 92 кГц, формируемой генератором U96, описываемого директивой .define, используют подменю Stim1:1-Bit Digital Stimulus (рис.10.12)

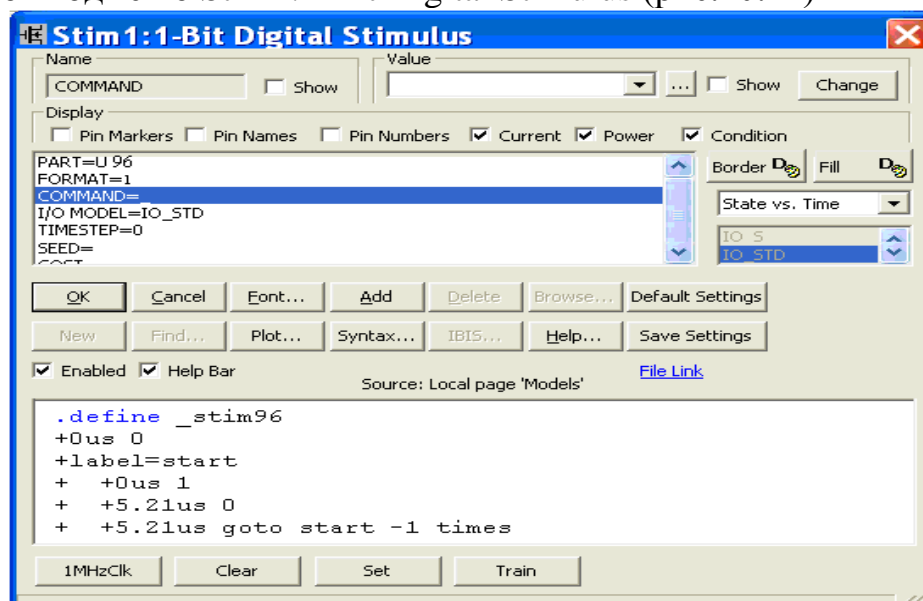


Рис.10.12

и размещают его условное графическое обозначение в окне схем (как, например, на рис.10.3) . Тогда для подключения к входу преобразователя необходимого генератора будет необходимо просто, активирова УГО генератора левой кнопкой мыши, переместить его к месту подключения. Переход в режим анализа преобразователя во временной области происходит выбором в меню строки команд последовательно: Analysis→Transient.... Затем в подменю Transient Analysis Limits (рис.10.13) задаются условия анализа.

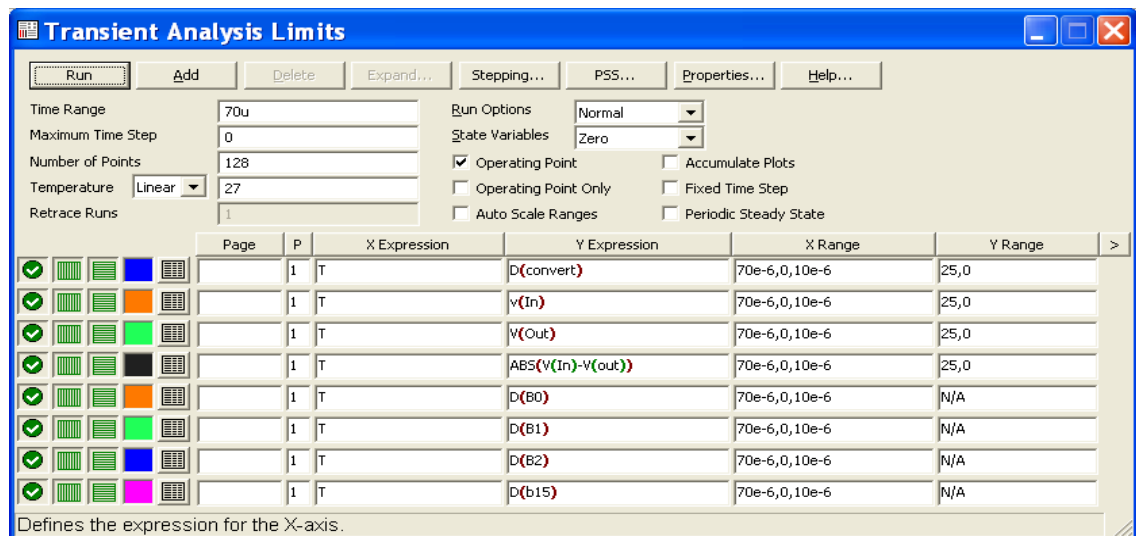






Рис.10.13

Основной параметр подменю время анализа (Time range) должно обеспечивать выполнение моделирования, по крайней мере, не менее периода колебаний аналогового сигнала (полтора - периода). В эксперименте Time range = 60 мкс, что является верхней границей анализируемого временного интервала, начиная с нулевого значения.

Максимальный шаг разбиения временного интервала интегрирования (Maximum Time Step) выбран равным нулю, что предполагает автоматический шаг разбиения, определяемый лишь допустимой относительной точностью, необходимой для обеспечения сходимости на каждой итерации при решении дифференциальных уравнений, описывающих схему, и составляющей по умолчанию 0,001.

Число точек (Number of Points), указывает число точек, выводимых на печать, когда активизирована пиктограмма вывода на печать численных значений  в какой-либо строке рассчитываемых графиков.

Указание на вывод графиков на экран монитора обеспечивается установкой метки  в любой строке таблицы, описывающей:

- способ масштабирования результатов по осям (  - равномерный по осям X и Y в прямоугольной системе координат, но может выбираться и логарифмический);
- цвет графика выводимой кривой (может выбираться нажатием на пиктограмму).

Каждая строка таблицы графиков, выводимых на экран монитора, может быть размещена на (Page) нескольких страницах (в данном случае не используется), а графики (Plots) - в одном семействе координат (как на рис.10.13, в столбце P внесена 1) или - в различных.

По оси абсцисс (XExpression) откладывается время (T) в диапазоне значений (XRange) от 0 мкс до 70 мкс с расстоянием между выводимыми на ось числовыми значениями через 10 мкс.

По оси ординат (YExpression) откладываются значения величин аналоговых  $V(In)$ ,  $V(Out)$  напряжений на входном и выходном узлах, а так же абсолютное значение их разности  $ABS(V(In)-V(Out))$ . В этой же системе координат представляются формы напряжений логических величин ( $D(Convert)$ ) – генератора тактовой частоты,  $D(B0)$ ,  $D(B1)$ ,  $D(B2)$ ,  $D(B15)$  – на цифровых выходах АЦП).

Примечание: в окне результатов вычислений приводятся значения, отражающие напряжение в узле, который обозначен некоторым словом (Out) или номером (B0, B1 и др.) вывода (не номером узла на схеме). Использование обозначений выводов упрощает анализ схемы, поскольку не требуется всякий раз указывать новые номера узлов при замене или добавлении компонентов в схеме, поскольку названия выводов сохраняются.

Нажатием кнопки Run в подменю Transient Analysis Limits переходим в режим анализа и на мониторе появляются графики напряжений в указанных узлах (рис.10.14)

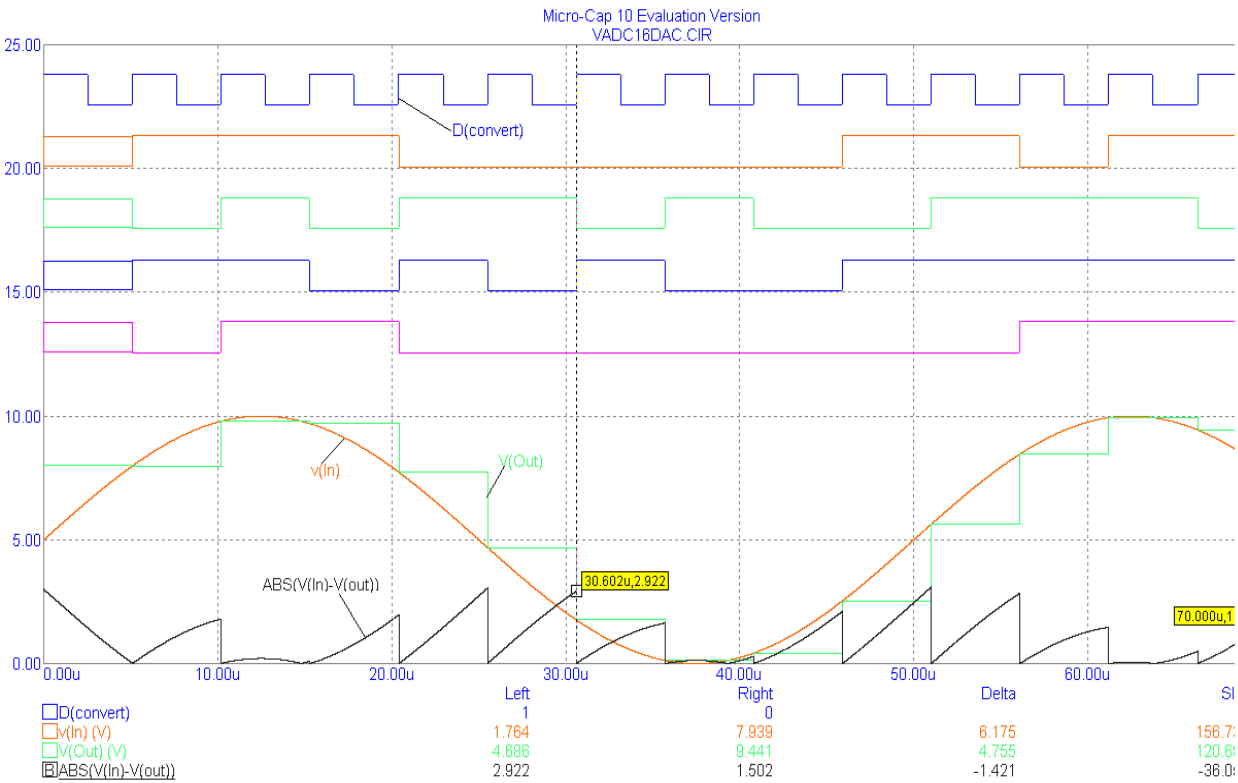


Рис.10.14



Кликнув мышью на выражение  $ABS(V(In)-V(Out))$  под семейством кривых обеспечим возможность оценки текущих, а так же максимальных  и минимальных  значений разности напряжений входного (аналогового сигнала) и восстановленного (импульсного) сигнала. Значение максимального отличия аналогового и восстановленного сигналов для выбранного значения частоты дискретизации ( $f = 192$  кГц) приведите в таблице 1

Таблица 1

Максимальное отличие, В	Разрядность преобразователей								
	8			12			16		
	Частота дискретизации, кГц			Частота дискретизации, кГц			Частота дискретизации, кГц		
	44,1	96	192	44,1	96	192	44,1	96	192
меандр									
узкий импульс									

Для получения формы спектра выходного сигнала ( $V(\text{Out})$ ) необходимо внести коррекцию в подменю Transient Analysis Limits (рис.10.15)

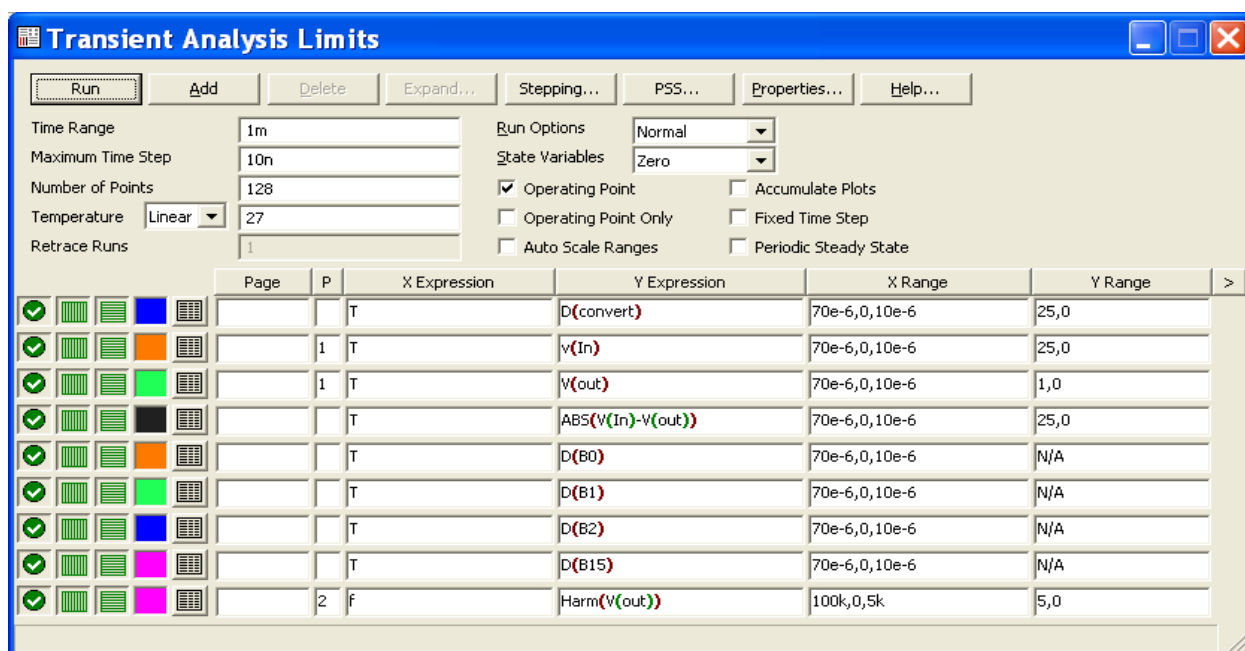


Рис.10.15

Кроме этого требуется указать условия, при которых проводится вычисление составляющих спектра выходного сигнала, для чего из подменю Transient Analysis Limits нажав на кнопку Properties..., выбрать закладку Plot (рис.10.16), где должны быть перечислены выводимые на экран монитора кривые (Curves) исследуемой схемы,

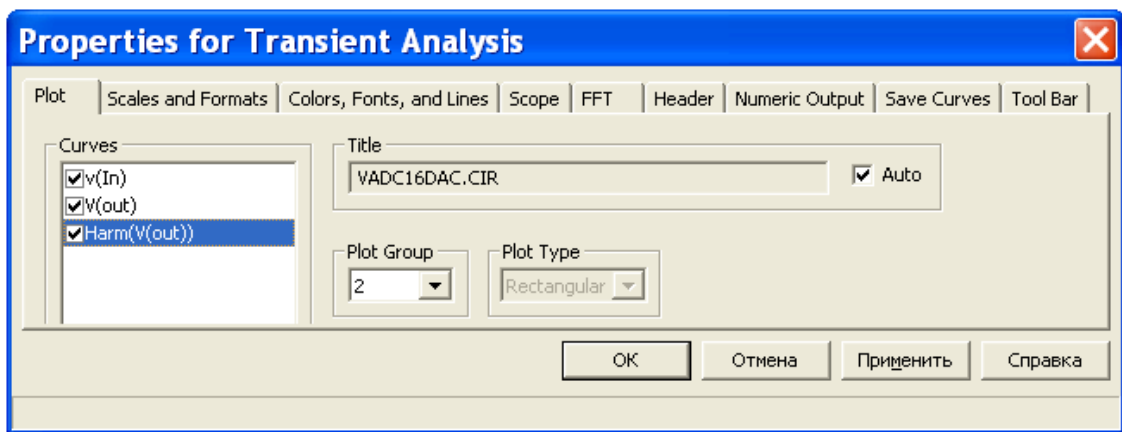


Рис.10.16

а, выбрав закладку FFT, укажите (или проверьте) условия анализа (рис.10.17)

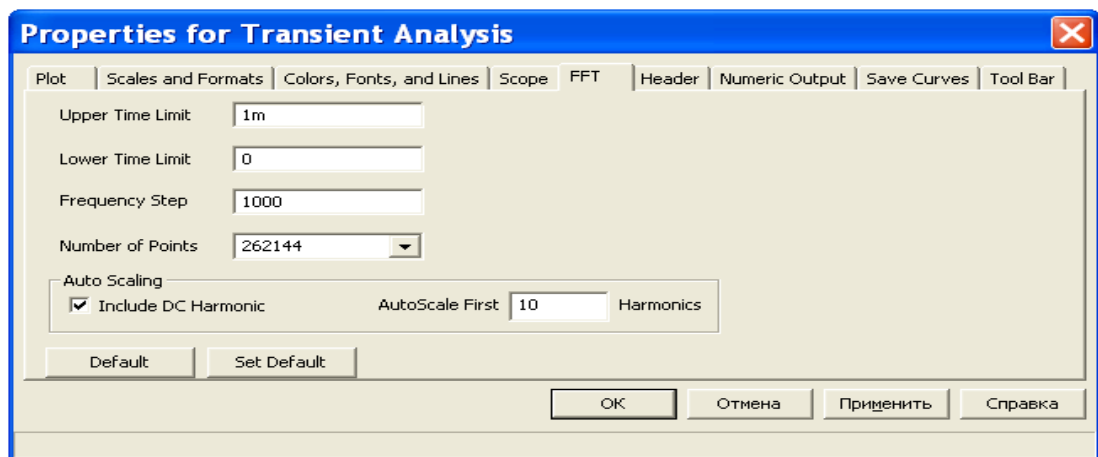


Рис.10.17

Upper Time Limit – верхнее значение временного интервала, в котором проводится

вычисление коэффициентов разложения в ряд Фурье;

Low Time Limit – нижнее значение временного интервала;

Frequency Step – интервал частот (Гц), определяющий минимальное отличие вычисляемых гармоник;

Number of Points – число точек разбиения временного интервала при нахождении составляющих спектра;

Auto Scaling – выбор способа вывода на экран монитора результатов вычислений:

Include DC Harmonic – включать постоянную составляющую (ставится метка;

AutoScale First 10 Harmonics – количество гармоник основной частоты, выводимых на экран (десять). Нажатие на кнопку ОК подменю Properties for Transient Analysis подтверждает выбранный вариант анализа и затем проводится анализ (Run). Вычисления проводятся для трех значений частоты дискретизации и к отчету по лабораторной работе прилагаются распечатки спектра. Для установления соответствия графика и частоты дискретизации

перед распечаткой на строке инструментов выберите пиктограмму **T** и, выбрав закладку Font в подменю Grid Text, укажите размер шрифта (не менее 18) и наберите текст: частота дискретизации 192 кГц (или другое значение частоты).

Повторите проведенные расчеты спектра выходного сигнала для других частот дискретизации и результаты приложить к отчету.

#### 4.2 Влияние разрядности преобразователей на ошибку восстановления

Для выполнения п.3.2 необходимо в используемой ранее схеме 16-разрядного преобразователя подключить на вход Converter генератор прямоугольной последовательности Stim1 с частотой 96 кГц (U96), заменив U192. Затем, используя подменю Transient Analysis Limits (рис.10.13), задают условия анализа свойств преобразователей аналогового сигнала во временной области и результаты вносят в таблицу 1.

Выполнение аналогичного эксперимента для 12-разрядного преобразователя проводится с использованием файла, находящегося в папке DataCh, с названием VADC12DAC. Результаты моделирования вносите в таблицу 1.

Файл VADC8DAC, находящийся в папке DataCh позволяет повести моделирование для 12-разрядных АЦП и ЦАП при воздействии генератора U96 на входе Converter, создающего последовательность прямоугольных импульсов типа меандр. Результаты анализа внесите в таблицу 1.

#### 4.3 Оценка влияния ширины импульса дискретизации

Исследование свойств преобразователей аналогового сигнала проводилось при использовании последовательности прямоугольных импульсов (меандр) в качестве дискретизирующей. Оценим влияние ширины импульса дискретизации, используя источник DClock как генератор импульсов малой длительности, выполнив: Component→Digital Primitives→Stimulus Generators→DClock (рис.10.18), находясь в окне схем преобразователя VADC12DAC.

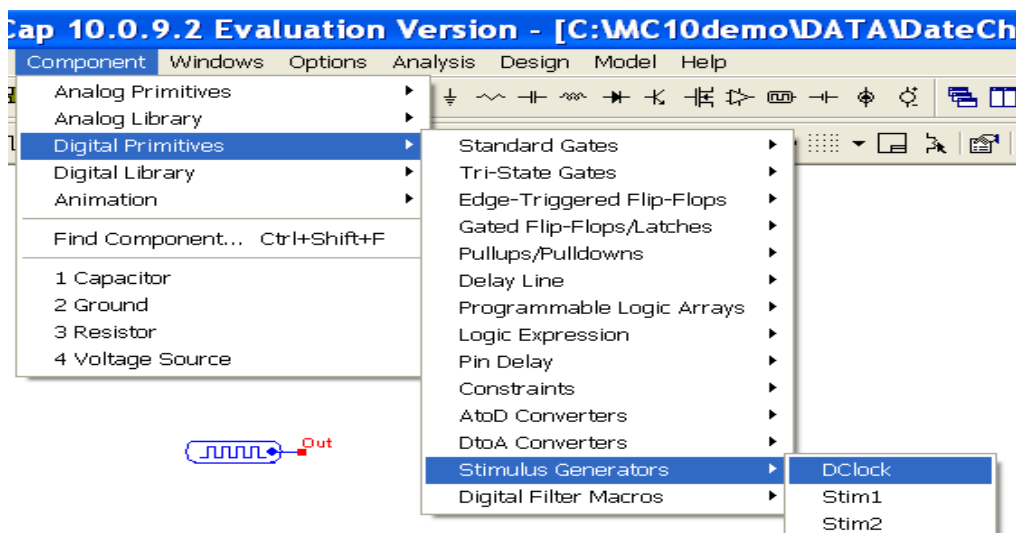


Рис.10.18

Параметры источника прямоугольных импульсов зададим, используя подменю: DClock:Digital Clock Stimulus Macro (рис.10.19)

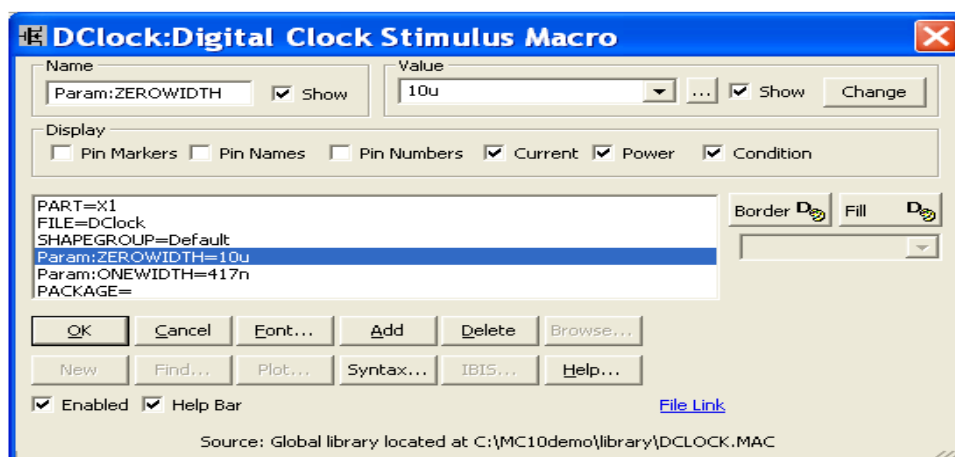


Рис.10.19

Заменяв генератор U96 источником прямоугольных импульсов длительностью 417 нс, проведите моделирование и, оценив наибольшую погрешность, внесите ее таблицу 1 и повторите эксперимент для 8-ми и 12-разрядных преобразователей.

## 5 Содержание отчета

Отчет должен включать в себя:

- Наименование и цель работы.
- Исследуемые схемы 8 – , 12 – , и 16 - разрядных преобразователей АЦП-ЦАП.
- Заполненную таблицу 1.
- Распечатки результатов моделирования преобразователя АЦП-ЦАП в соответствии с требованиями задания на лабораторную работу.

- Краткие выводы.

## 6 Контрольные вопросы

1. Каково основное применение преобразователей АЦП-ЦАП в устройствах связи?
2. В чем отличие между квантованием и кодированием?
3. Что такое шаг квантования?
4. Откуда возникают шумы квантования и как их уменьшить?
5. Изложите принципы построения ЦАП.
6. Изобразите структурную схему ЦАП с суммированием токов.
7. Изобразите структурную схему ЦАП с суммированием напряжений.
8. Изобразите структурную схему и изложите принцип работы АЦП с преобразованием напряжения во временной интервал.
9. Изобразите схему АЦП с двойным интегрированием и объясните принцип действия.
10. Приведите схему АЦП последовательного типа и поясните принцип действия.
11. В чем принцип действия АЦП следящего типа? Изобразите схему такого АЦП.
12. На каком принципе построен АЦП последовательного приближения? Изобразите схему его реализующую.

## 7 Литература

1. **Калабеков Б.А.** Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учебник для техникумов связи/ Б.А. Калабеков - М.: Горячая линия – Телеком, 2007. - 336 с.
2. **Опадчий Ю.Ф.** Аналоговая и цифровая электроника/ Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров - М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 768 с.
3. **Новиков Ю.В.** Введение в цифровую схемотехнику/ Ю.В.Новиков – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.-343 с.
4. **Амелин М.А.** Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap8 / М.А. Амелин, С.А. Амелина - М.: Горячая линия -Телеком, 2007. – 464 с.
5. **Фриск В. В.** Основы теории цепей, основы схемотехники, радиоприемные устройства. Лабораторный практикум на персональном компьютере/В. В. Фриск, В. В. Логвинов–М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 608 с.

## Приложение

Считая, что в процессе квантования аналогового сигнала напряжение в каждый момент его дискретизации округляется до ближайшего уровня квантования. При расстоянии между уровнями определяемого шагом квантования  $\Delta$ , величина ошибки квантования  $\varepsilon_{кв}$  будет принимать значения  $-\Delta/2 \leq \varepsilon_{кв} \leq +\Delta/2$ . Поскольку процедура округления никак не связана с уровнем квантования, то величины  $\varepsilon_{кв}$  при каждом некоррелированы, и



значение среднеквадратичной ошибки квантования определяется как  $\sigma_{\text{кв}} = \Delta / (3\sqrt{2})$ .

Для известного диапазона изменения значений аналогового сигнала (рис.10.14)  $A = U_{\text{max}} - U_{\text{min}}$  требуемое число уровней квантования определяется соотношением  $N = A / \Delta + 1$ . Отсюда видно, что с уменьшением шага квантования (увеличения числа разрядов АЦП) приводит к уменьшению ошибки квантования. При представлении номеров уровней квантования двоичными числами число уровней квантования  $N$  определяется при  $n$  разрядном АЦП, как:  $N = 2^n$ .

Средняя мощность аналогового сигнала на входе АЦП при высоте ступени  $\Delta$  и общем числе уровней квантования  $N$  (при отсутствии искажений формы)  $P_c = 1/2((N/2)\Delta)^2$ , а средняя мощность помехи  $\Delta(t)$  при высоте треугольного зубца  $\Delta/2$  определяется соотношением  $P_n = 1/3(\Delta/2)^2$ , а отношение сигнала/помеха по мощности определяется

$$\frac{P_c}{P_n} = \frac{3}{2} N^2$$