

## Практическая работа №7

### Изучение принципов работы АЦП и ЦАП

#### 1. Аналого-цифровое преобразование

Аналого-цифровой преобразователь (Analog-to-digital converter, ADC) – это устройство, которое принимает входные аналоговые сигналы и генерирует соответствующие им цифровые сигналы, пригодные для обработки микропроцессорами и другими цифровыми устройствами.

Как правило, сначала различные по физической природе величины преобразуются в функционально связанные с ними электрические величины, а затем уже с помощью преобразователей напряжение-код – в цифровые.

Аналого-цифровое преобразование непрерывных сигналов, которое реализуют с помощью АЦП, представляет собой преобразование непрерывной функции времени  $U(t)$ , описывающей исходный сигнал, в последовательность чисел  $\{U_k(t_j)\}$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots$ ,  $U_k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , отнесенных к некоторым фиксированным моментам времени. Такое преобразование состоит из двух независимых процедур. Первая из них называется дискретизацией и состоит в преобразовании непрерывной функции времени  $U(t)$  в непрерывную последовательность отсчетов  $\{U(t_j)\}$ . Вторая называется квантованием и состоит в преобразовании непрерывной по значению последовательности отсчетов  $\{U(t_j)\}$  в дискретную  $\{U_k(t_j)\}$ , где  $U_k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

В основе дискретизации непрерывных сигналов лежит принципиальная возможность их представления в виде взвешенных сумм

$$U(t) = \sum_j a_j f_j(t),$$

где  $a_j$  – некоторые коэффициенты или отсчеты, характеризующие исходный сигнал в дискретные моменты времени;  $j = 1, 2, 3, \dots$ ;  $f_j(t)$  – набор элементарных функций, используемых при восстановлении сигнала по его отсчетам.

В основе наиболее распространенной равномерной дискретизации лежит теорема отсчетов Котельникова, для которой в качестве коэффициентов  $a_j$  следует использовать мгновенные значения сигнала  $U(t_j)$  в дискретные моменты времени  $t_j$

$= j\Delta t$ , а период дискретизации выбирать из условия  $\Delta t = 1/2F_m$ , где  $F_m$  – максимальная частота спектра преобразуемого сигнала.

При выполнении процедуры квантования непрерывная по уровню последовательность отсчетов  $U(t_j)$  представляется  $k$ -разрядным кодом  $U_k(t_j)$ , равным 0, 1, 2, ...,  $N-1$ . Количество уровней квантования  $N$  зависит от значения  $k$  – разрядности АЦП.  $N = 2^k$ .

### Классификация и принцип действия АЦП

В настоящее время используется большое число методов преобразования напряжение-код. Эти методы отличаются потенциальной точностью, скоростью преобразования и сложностью аппаратной реализации. На рис. 1 представлена классификация АЦП по методам преобразования. В основе классификации АЦП используется признак, указывающий на то, как во времени разворачивается процесс преобразования аналоговой величины в цифровую. Для преобразования дискретных по времени сигналов в цифровые эквиваленты используются операции квантования и кодирования. Они могут быть осуществлены с помощью либо последовательной, либо параллельной, либо параллельно-последовательной процедур приближения цифрового эквивалента к преобразуемой величине.

Наиболее быстрыми являются параллельные АЦП, однако они самые дорогие и потребляют (рассеивают) значительную мощность. Последовательно-параллельные АЦП занимают промежуточное положение по разрешающей способности и быстродействию между параллельными АЦП и последовательными.



Рис. 1. Классификация АЦП

## Основные параметры АЦП

К основным параметрам АЦП относят число разрядов выходного кода, диапазон изменения входного напряжения  $u_{\text{вх.max}}$ , абсолютную разрешающую способность, абсолютную погрешность преобразования, максимальную частоту преобразования, время преобразования входного сигнала.

*Число разрядов выходного кода*  $k$  отображает исходную аналоговую величину, которая формируется на выходе АЦП. При использовании двоичного кода  $k = \log_2 N$ , где  $N$  - максимальное число кодовых комбинаций (уровней квантования) на выходе АЦП (0, 1, ...  $N-1$ ).

*Диапазон изменения входного напряжения* -  $u_{\text{вх.max}}$ . Отметим, что АЦП может обрабатывать входную информацию в виде однополярного аналогового напряжения с пределами 0, ...,  $u_{\text{вх.max}}$  и двуполярного  $\pm u_{\text{вх.max}}/2$ .

*Абсолютная разрешающая способность* – среднее значение минимального изменения входного сигнала  $u_{\text{вх}}$ , обуславливающего увеличение или уменьшение выходного кода на единицу. Разрешающая способность определяется разрядностью выходного кода и диапазоном входного напряжения.

*Абсолютная погрешность преобразования* -  $\delta_i$ , в конечной точке шкалы есть отклонение реального максимального значения входного сигнала  $u_{\text{вх.max}}$  от максимального значения идеальной характеристики  $L$  АЦП (рис. 2). Обычно  $\delta_i$  измеряется в ЗМР – значении младшего разряда.

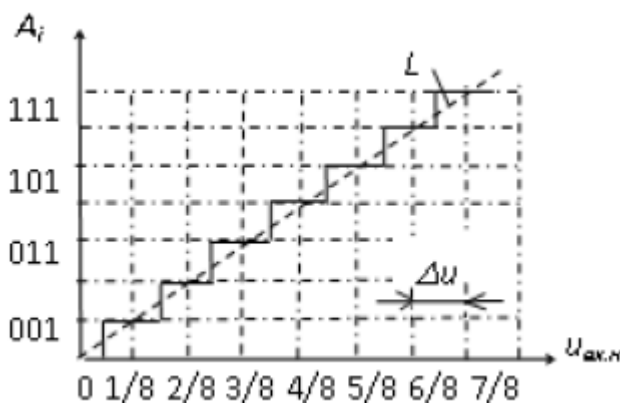


Рис. 2. Абсолютная погрешность преобразования АЦП

*Максимальная частота преобразования* (десятки и сотни кГц) – максимальное значение частоты входного сигнала.

Время преобразования входного сигнала  $t_{\text{пр. max}} \leq (1/2)\Delta t$ .

## 2. Цифро-аналоговое преобразование

Устройство, осуществляющее автоматическое преобразование входных значений, представленных числовыми кодами, в эквивалентные им значения какой-нибудь физической величины (напряжения, тока и др.), называют цифроаналоговым преобразователем (ЦАП). Основы классификации ЦАП представлены на рис. 3.



Рис. 3. Общая классификация ЦАП

### Основные характеристики ЦАП

Основными параметрами ЦАП являются число разрядов кода, абсолютная разрешающая способность, точность ЦАП, максимальная частота преобразования.

*Число разрядов кода,  $n$ , обычно составляет величину 8, ..., 24.*

*Абсолютная разрешающая способность* - среднее значение минимального изменения сигнала на выходе ЦАП, обусловленное увеличением или уменьшением его кода на единицу.

Теоретически ЦАП, преобразующий  $n$ -разрядные двоичные коды, должен обеспечить  $2^n$  различных значений выходного сигнала с разрешающей способностью  $1/(2^n - 1)$ . При числе разрядов  $n = 8$ , количество независимых квантов (ступеней) выходного напряжения ЦАП равно  $2^8 - 1 = 255$ , при  $n = 12$ , количество независимых ступеней равно  $2^{12} - 1 = 4095$  и т. д.

Абсолютное значение минимального кванта напряжения определяется как предельным принимаемым числом  $2n - 1$ , так и максимальным выходным напряжением ЦАП, также называемым напряжением шкалы или опорным напряжением  $u_0$ . Значение абсолютной разрешающей способности ЦАП, часто обозначается как ЗМР (значение младшего разряда).

$$\begin{aligned} \text{При } n = 8 \text{ и опорном напряжении } u_0 = 5 \text{ В, ЗМР} &= u_0 / (2^8 - 1) = \\ &= 5 / 255 \approx 0,0196 \text{ В} = 19,6 \text{ мВ.} \end{aligned}$$

Отличие реального значения разрешающей способности от теоретического обусловлено погрешностями и шумами входящих в ЦАП узлов.

*Точность ЦАП* определяется значением абсолютной погрешности  $\delta_a$  и нелинейностью преобразователя  $\delta_{\text{л}}$ .

Абсолютная погрешность  $\delta_a$  характеризуется отклонением максимального значения выходного напряжения  $u_{\text{max}}$  от расчетного, соответствующего конечной точке характеристики идеального преобразователя, и измеряется обычно в единицах ЗМР (рис. 4, линия 1).

*Нелинейность преобразователя*  $\delta_{\text{л}}$  характеризует отклонение действительной характеристики 2 от идеальной 1 (рис. 4), проведенной через центры ступенек или через нуль и точку максимального значения выходного сигнала.

Нелинейность обычно определяется в относительных единицах, но в справочных данных приводится также и в ЗМР.

$$\delta_{\text{л}} = \frac{\varepsilon_j}{U_{\text{ПШ}}} \cdot 100\%.$$

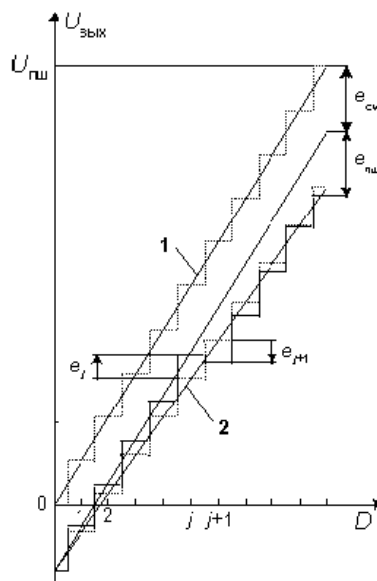


Рис. 4. Характеристики преобразования ЦАП: 1 – идеальная, 2 – реальная.

$U_{\text{пш}}$  – погрешность полной шкалы

Дифференциальная нелинейность  $\delta_{\text{дл}}$  – максимальное изменение (с учетом знака) отклонения реальной характеристики преобразования  $U_{\text{вых}}(D)$  от оптимальной при переходе от одного значения входного кода к другому смежному значению. Обычно определяется в относительных единицах или в ЗМР.

$$\delta_{\text{дл}} = \frac{\varepsilon_j + \varepsilon_{j+1}}{U_{\text{пш}}} \cdot 100\%.$$

Из динамических параметров наиболее важным параметром является максимальная частота преобразования  $f_{\text{max}}$  (десятки и сотни кГц) – наибольшая частота дискретизации, при которой параметры ЦАП соответствуют заданным значениям.

Преобразование сигнала в ЦАП часто сопровождается специфическими переходными импульсами в выходном сигнале. Они возникают из-за разности времени открывания и закрывания аналоговых переключателей в ЦАП. Особенно сильное влияние переходных процессов проявляется, например, когда входной код 01...111 сменяется кодом 10...000, а переключатель старшего разряда ЦАП открывается позже, чем закрываются переключатели младших разрядов.

### 3. Задание на практическую работу

Собрать схему приведенную на рис. 5. Схема содержит МК 8051, АЦП, ЦАП. МК должен передавать код, полученный с выхода АЦП на вход ЦАП. Параметры элементов задаются в соответствии с вариантом (табл. 2).

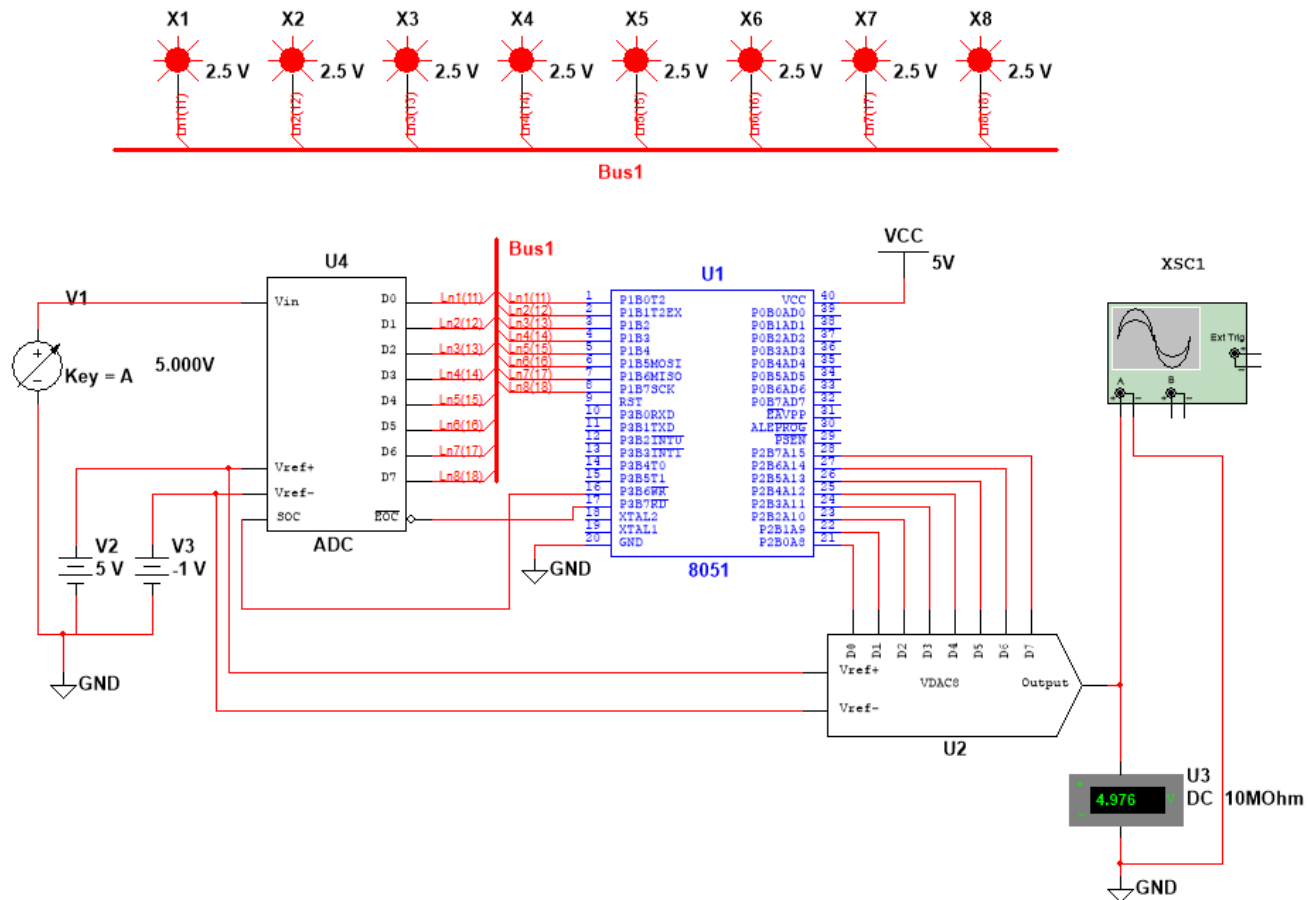


Рис. 5. Схема подключения

В схеме используется виртуальный АЦП и виртуальный ЦАП (находятся в группе элементов Mixed). Источники напряжений V2 и V3 (подключены ко входам Vref+ и Vref-, если в варианте задания указано разнополярное опорное напряжение, если используется только положительное опорное напряжение, то V2 подключается к Vref+, V3 не используется, а вывод Vref- замыкается на землю), V1 регулируемый источник постоянного напряжения (DC\_INTERACTIVE\_VOLTAGE).

Назначение выводов, используемого АЦП приведено в табл. 1.  
Табл. 1. Назначение основных выводов виртуального АЦП

Обозначение	Вход/выход	Назначение
-------------	------------	------------

Vin	I	Аналоговое входное напряжение
Vref+	I	Опорное напряжение (+)
Vref-	I	Опорное напряжение (-)
D0-D7	O	Цифровые выходы
SOC	I	Начать преобразование
EOC	O	Конец преобразований

Для начала преобразования необходимо подать на вход SOC 1. При этом на выходе EOC будет 1 до окончания преобразования. Когда преобразование завершится на выходе EOC будет 0. После этого можно начинать следующее преобразования.

Пробники показывают код на выходе АЦП. Напряжение на выходе ЦАП фиксируется вольтметром и осциллографом.

Напишите программу для МК, проверьте правильность работы схемы. Для двух крайних значений диапазона преобразования и для любых трех значений  $U_{вх}$  из диапазона зафиксировать значения кода на выходе АЦП и значение напряжения на выходе ЦАП.

Табл. 2. Варианты заданий

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vref1	+2,5	+5	+4	+5	+3	+2,5	+2	+5	+4	+3
Vref2	-2,5	0	-1	0	-2	-2,5	-2	0	-1	-1

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vref1	+4,5	+4	+1,5	+3,5	+3,5	+2	+3	+5	+4	+5
Vref2	-0,5	-1	-3,5	-1,5	-2	-3	-4	0	-1	0