

Лабораторная работа № 7.

Изучение принципов работы аналого-цифровых преобразователей

Цель работы: изучение основ работы аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и исследование особенностей их функционирования на примере виртуального 8-разрядного АЦП, представленного в базе данных Multisim.

2.7.1. Основные сведения об аналого-цифровых преобразователях

2.7.1.1. Принципы преобразования непрерывных сигналов в цифровые коды

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 [9].

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 [9]. Эти методы отличаются потенциальной точностью, скоростью преобразования и сложностью аппаратной реализации. На рис. 2.52 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.

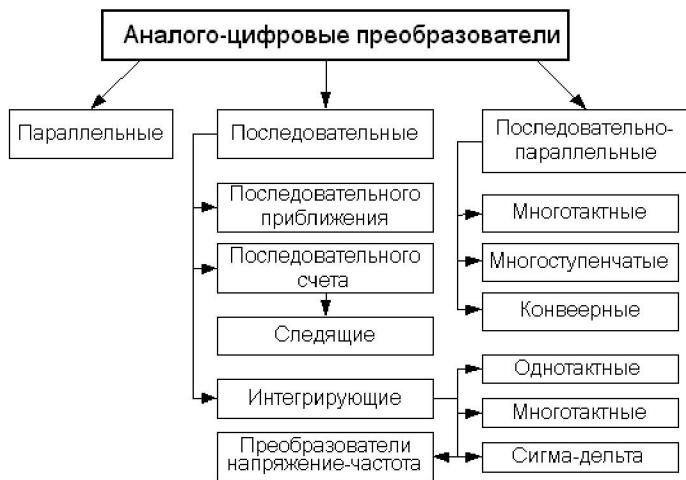


Рис. 2.52. Классификация АЦП

Особенности построения и функционирования различных типов АЦП изложены, например, в [9]. Рассматриваемые ниже АЦП последовательного счета и приближения находят широкое применение в системах управления, контроля и цифровой обработки сигналов.

АЦП последовательного счета

Этот преобразователь является типичным примером последовательных АЦП с единичными приближениями и состоит из компаратора, счетчика и ЦАП (рис. 2.53). На один из входов компаратора поступает преобразуемый аналоговый сигнал, а на другой – сигнал обратной связи с ЦАП.

Работа АЦП начинается с прихода импульса запуска, который включает счетчик, суммирующий число импульсов, поступающих от генератора тактовых импульсов – ГТИ. Выходной код счетчика подается на ЦАП, осуществляющий его преобразование в напряжение обратной связи U_{os} . Процесс преобразования продолжается до тех пор, пока напряжение обратной связи сравняется с входным напряжением и переключится компаратор, который своим выходным сигналом прекратит поступление тактовых импульсов на счетчик. Переход выходного значения компаратора из 1 в 0 означает завершение процесса преобразования.

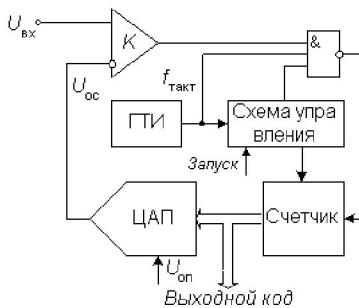


Рис. 2.53. Структурная схема АЦП последовательного счета

Полученный выходной код, пропорциональный входному напряжению в момент окончания преобразования, считывается с выхода счетчика.

АЦП данного типа без устройства выборки-хранения (УВ/Х) пригодны для работы с постоянными или медленно изменяющимися напряжениями, которые за время преобразования изменяются не более, чем на значение кванта преобразования. Таким образом, недостатком АЦП последовательного счета является небольшая частота дискретизации, достигающая нескольких килогерц.

Преимуществом АЦП данного класса является сравнительная простота построения, определяемая последовательным характером выполнения процесса преобразования.

Назначение и структура устройства выборки и хранения

Устройство выборки и хранения (УВ/Х) предназначено для приема и хранения на время преобразования входных отсчетов, равных напряжениям входных сигналов в соответствующие дискретные моменты времени. Структурная схема УВ/Х представлена на рис. 2.54.

Необходимость хранения значения входного сигнала в течение времени его преобразования связана с неопределенностью значения этого сигнала в случае быстрого его изменения, что при отсутствии УВ/Х может привести к динамической ошибке преобразования. Кроме того, УВ/Х употребляется в многоканальных АЦП для запоминания мгновенных значений какого-либо канала и его преобразования с одновременным переключением мультиплексора на следующий канал.

По переднему фронту тактового сигнала (TC) устройство осуществляет отсчет (выборку) входного аналогового сигнала при замыкании ключа.



Рис. 2.54. Упрощенная структурная схема УВ/Х

Режим выборки характеризуется временем захвата (2, 4, 6, 10 и более мкс), когда конденсатор заряжается на величину $U_{\alpha}(t)$. Чем меньше время захвата (меньше емкость конденсатора C), тем меньше соответствующая точность и увеличивается падение напряжения в процессе хранения.

По заднему фронту тактового сигнала T_C происходит размыкание ключа, и значение отсчета (напряжения) сохраняется, пока АЦП выполняет преобразование. Следует отметить, что хранимое напряжение не остается постоянным, из-за наличия утечки заряда конденсатора C . Связь УВ/Х с АЦП представлена на рис. 2.55.

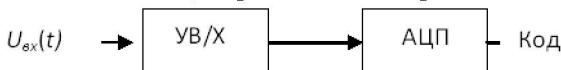


Рис. 2.55. Упрощенная схема АЦП с УВ/Х

АЦП последовательного приближения

Преобразователь этого типа, также называемый АЦП с поразрядным уравновешиванием, является наиболее распространенным вариантом последовательных АЦП. В основе его работы лежит принцип дихотомии, т. е. последовательного сравнения измеряемой величины с $1/2$, $1/4$, $1/8$ и т. д. от возможного максимального значения ее.

Рассмотрим основы работы АЦП последовательного приближения на примере классической структуры 4-разрядного преобразователя, состоящего из трех основных узлов: компаратора, регистра последовательного приближения (РПП) и ЦАП (рис. 2.57).

После подачи команды «Пуск» с приходом первого тактового импульса РПП принудительно задает на входе ЦАП код, равный по-

ловине его шкалы (для 4-разрядного ЦАП это $1000_2 = 8_{10}$). Благодаря этому напряжение обратной связи на выходе ЦАП – $U_{oc} = 2^3 h$, где h – квант выходного напряжения ЦАП, соответствующий единице младшего разряда (EMP).

Данное значение U_{oc} составляет половину возможного диапазона преобразуемых сигналов. Если входное напряжение АЦП больше, чем эта величина, то на выходе компаратора устанавливается 1, если меньше, то 0. При 0 на выходе компаратора схема управления должна переключить старший разряд d_3 АЦП обратно в состояние нуля. Полученный остаток ($U_{bx} - d_3 2^3 h$) таким же образом сравнивается с ближайшим младшим разрядом и т. д.

После четырех подобных шагов в регистре последовательного приближения оказывается двоичное число, из которого после цифроаналогового преобразования получается напряжение, соответствующее значению U_{bx} с точностью до EMP. В процессе преобразования на выходе компаратора (см. рис. 2.56) формируется выходное число в виде последовательного кода старшими разрядами вперед.

Данный класс АЦП занимает промежуточное положение между последовательно-параллельными и интегрирующими АЦП по быстродействию, стоимости и разрешающей способности и находит широкое применение в системах управления, контроля и цифровой обработки сигналов.

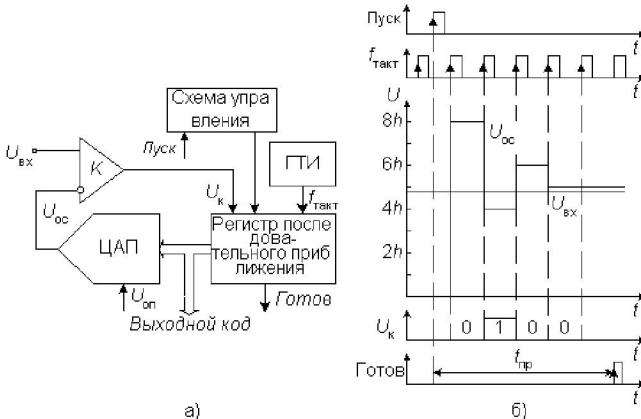


Рис. 2.56. Структурная схема АЦП последовательного приближения

2.7.1.3. 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 ($0, 1, \dots, N-1$).

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

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 – δ_i , в конечной точке шкалы есть отклонение реального максимального значения входного сигнала $u_{\text{вх},\max}$ от максимального значения идеальной характеристики L АЦП (рис. 2.57). Обычно δ_i измеряется в ЗМР – значении младшего разряда.

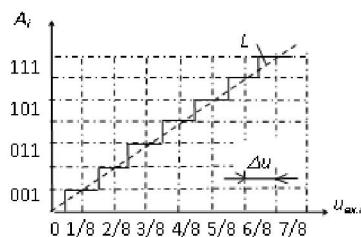


Рис. 2.57. Абсолютная погрешность преобразования АЦП

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

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

2.7.2. Ход выполнения лабораторной работы

Задание 1. Собрать схему для исследования точности преобразования АЦП [10].

Создаем схемный проект (рис. 2.58), в котором использованы элементы: виртуальный 8-разрядный АЦП – A1 (рис. 2.60) и виртуальный ЦАП – A2 из группы элементов Mixed; источники напряжений (из группы элементов Sources): постоянного опорного напряжения V1 и V2 (подключены ко входам Vref+ и Vref-, если в варианте задания указано разнополярное опорное напряжение, либо Vref+ и земля, если используется только положительное опорное напряжение); генератор импульсного напряжения V4 для синхронизации работы АЦП (подключен к входу SOC); источник постоянного напряжения V3 для подачи входного напряжения, которое необходимо преобразовать в код; пробники X0, ..., X9 и вольтметр U1 (из группы элементов Indicators), а также инвертор U1A из группы элементов TTL, который подает перепад напряжения от 5 В до 0 на вход OE АЦП от источника V4 в противофазе с входом SOC, разрешая появления цифрового кода D0...D7 на выходах АЦП.

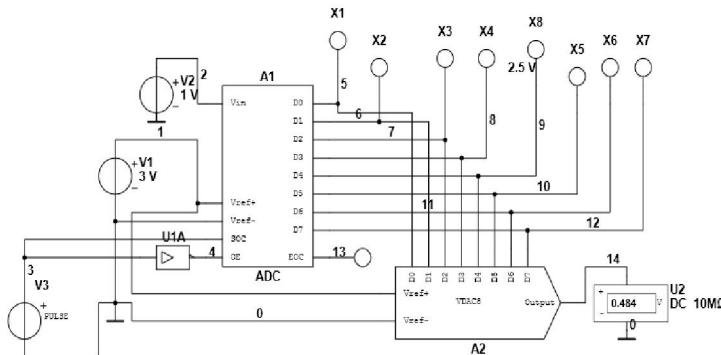


Рис. 2.59. Схема для исследования работы 8-разрядного АЦП

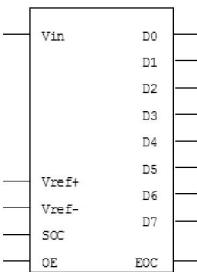


Рис. 2.60. Условное графическое обозначение УГО АЦП

Назначение выводов используемого в схеме АЦП приводится в табл. 2.17.

Таблица 2.17

Назначение основных выводов виртуального АЦП

Обозначение	Вход / выход	Назначение
V _{in}	I	Аналоговое входное напряжение
V _{ref+}	I	Опорное напряжение (+)
V _{ref-}	I	Опорное напряжение (-)
D0- D7	O	Цифровые выходы
SOC	I	Начать преобразование
EOC	O	Конец преобразований
OE	I	Разрешение цифрового вывода

Исследования точности АЦП проводятся по следующей схеме [10].

- Для источников V1 и V2 устанавливаются соответствующие заданию (табл. 2.19) значения опорного напряжения, например, V1 = +2,5 В, V2 = -2,5 В.
- Поочередно на вход Vin АЦП подается 10 различных напряжений из диапазона изменения опорного напряжения V_{ref}, например, u_{bx} = 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,4; -0,5; -1,0; -2,0 В (используется источник входного напряжения V3).
- Для каждого значения входного напряжения Vin запускается программа моделирования. Выходной код, определяемый по свечению пробников X7, ..., X0, и значения напряжения u_{вых ЦАП} с выхода ЦАП, измеряемые вольтметром U1, заносятся в поля таблицы вида 2.18.
- Для 8-разрядного АЦП по значению входного напряжения u_{bx} можно определить значение выходного кода – D_{(10)расч} по формуле:

$$D_{(10)\text{расч}} = 256u_{\text{bx}} / (V_1 + | - V_2 |), \quad (2.7.1)$$

5. Производятся необходимые расчеты для заполнения всех столбцов табл. 2.18. Если значения опорного напряжения разнополярные, то код, определяемый по свечению пробников, является инверсным. При этом, если полученное значение кода больше 128, то результат положительный, а если меньше – отрицательный. Десятичные инверсные сигналы $D_{(10)\text{инв}}$ преобразуются в прямые $D_{(10)}$ по выражению:

$$D_{(10)} = D_{(10)\text{инв}} - 128. \quad (2.7.2)$$

6. Рассчитываются погрешности измерения напряжения по выражению:

$$\Delta U \% = 100(u_{\text{вых(AЦП)}} - u_{\text{вх}})/u_{\text{вх}}. \quad (2.7.3)$$

Таблица 2.18

Пример исследования АЦП

$u_{\text{вх}},$ В	$u_{\text{вых(AЦП)}},$ В	$D_{(2)}$	$D_{(16)}$	$D_{(10),\text{инв}}$	$D_{(10)}$	$D_{(10)\text{расч}}$	$\Delta U, \%$
0,1	0,09375	10000100	84	132	4	4,27	6,25
0,5	0,5156	10010101	95	149	21	21,33	3,12
1,0	0,9644	10101010	AA	170	42	42,67	3,56
2,0	2,017	11010101	D5	213	85	85,34	0,85
2,5	2,484	11101010	EA	234	106	106,67	0,64
2,9	2,906	11110111	FB	251	123	123,74	0,21
-1,0	-0,9844	01010101	55	85	-43	-42,67	3,56

Задание 2. Выполнить соответствующий вариант задания при подключении МК к АЦП. Получить значения выходного кода АЦП для любых трех значений изменения $u_{\text{вх}}$ (выбирается из диапазона изменений V_{ref} , см. табл. 2.19).

Создаем схемный проект Circuit 7, устанавливаем на рабочей области МК-51, исследуемый виртуальный АЦП (8- или 16-разрядный). Подаем с источника постоянного тока $V1$ на вход АЦП напряжение, например, 1В, к выводу опорного напряжения АЦП подключаем источник напряжения $V2$, например, 5В. К порту P2 МК подключаем пробники X0, ..., X7, вывод P3.6 соединяем с входом АЦП – SOC. Схема подключения MCS-51 к АЦП представлена на рис. 2.61.

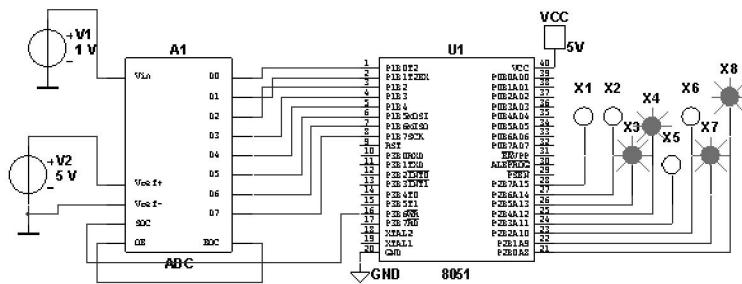


Рис. 2.61. Схема подключения МК-51 к АЦП

Активируем вкладку программного файла main.c и вставим следующий программный код:

```
#include <8051.h> //подключаем заголовочный файл
void main ()
{
    unsigned char val; //переменная содержит цифровой код, отвечающий Ubx
    P1=0xFF; //инициализируем P1 на вход
    P2=0x00; //инициализируем P2 на выход
    P36=0; //P3.6 – выход
    P36=1; //начать преобразования
    val=P1; //P1 содержит цифровой код
    P2=val; //включаем пробники
    while (1); //бесконечный цикл
}
```

Пробник показывает цифровой код, равный 51, что соответствует выражению (2.7.2).

2.7.3. Задания для лабораторной работы

В соответствие с вариантом задания (табл. 2.19) исследовать точность виртуального АЦП (задание 1) согласно схеме, приведенной на рис. 2.59, и заполнить таблицу вида 2.18. Порядок выполнения задания 1 приведен в п. 2.7.2. Для выполнения задания 2 собрать схему (рис. 2.61) и для любых 3 значений U_{bx} из таблицы вида 2.18 при помощи пробников снять полученный цифровой код.

Таблица 2.19

Варианты заданий

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Разрядность АЦП	8	16	8	16	8	16	8	16	8	16
E_{ref1}	+2,5	+5	+4	+5	+3	+2,5	+2	+5	+5	+4
E_{ref2}	-2,5	0	-1	0	-2	-2,5	-2	0	0	-1

2.7.4. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Перечень элементов, использованных в схеме, с их краткими характеристиками.
3. Копия окна схемного файла при моделировании.
4. Заполненная при проведении моделирования по схеме 2.59 таблица типа 2.18.
5. Снятые показания пробников при моделировании по схеме 2.61.
6. Выводы по работе.

2.7.5. Вопросы для самоконтроля

1. Приведите примеры использования АЦП.
2. Дайте определение разрешающей способности АЦП.
3. Как определяется частота дискретизации аналогового сигнала?
4. В каких случаях используется двуполярное опорное напряжение?
5. Как производится квантование аналогового сигнала по уровню?
6. Как определяется цифровой код АЦП при известном входном аналоговом сигнале и заданных опорных напряжениях?
7. Чем отличается принцип работы АЦП последовательного счета от АЦП последовательного приближения?
8. В чем отличие принципов работы параллельных АЦП от принципов работы последовательных АЦП?
9. Для чего в структуре АЦП необходимо использовать устройство выборки и хранения?
10. Как определяется относительная точность преобразования АЦП?