



Микропроцессорная техника в приборах, системах и комплексах

Лекция 7

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)

Ушаков Андрей Николаевич, старший преподаватель кафедры
303

Виды сигналов

Для представления, передачи и обработки информации в информационных системах используются различные виды сигналов.

Под *сигналом* понимается физический процесс, значения параметров которого отображают некоторую информацию или сообщение. Наиболее распространёнными являются сигналы, представленные в виде электрических колебаний. Информативными параметрами таких сигналов могут быть амплитуда, длительность, частота, фаза и т. д.

Математически сигнал описывается вещественной или комплексной функцией некоторого вида, определённой на интервале вещественной оси (обычно – оси времени).

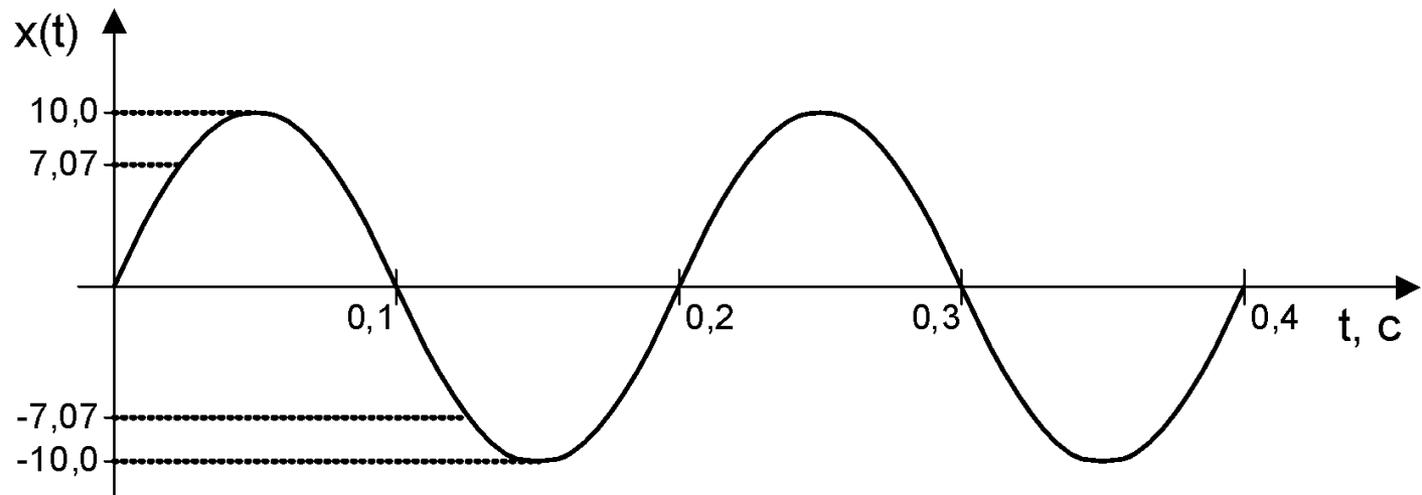
Аналоговые сигналы

Аналоговые сигналы описываются непрерывной (или кусочно-непрерывной) функцией $x(t)$, причём сама функция и аргумент t могут принимать любые значения на некоторых интервалах $x_1 \leq x \leq x_2, t_1 \leq t \leq t_2$.

Пример аналогового сигнала

● Пример аналогового сигнала:

$$x(t) = U_m \sin 2\pi f t, U_m = 10 \text{ В}, f = 5 \text{ Гц}$$



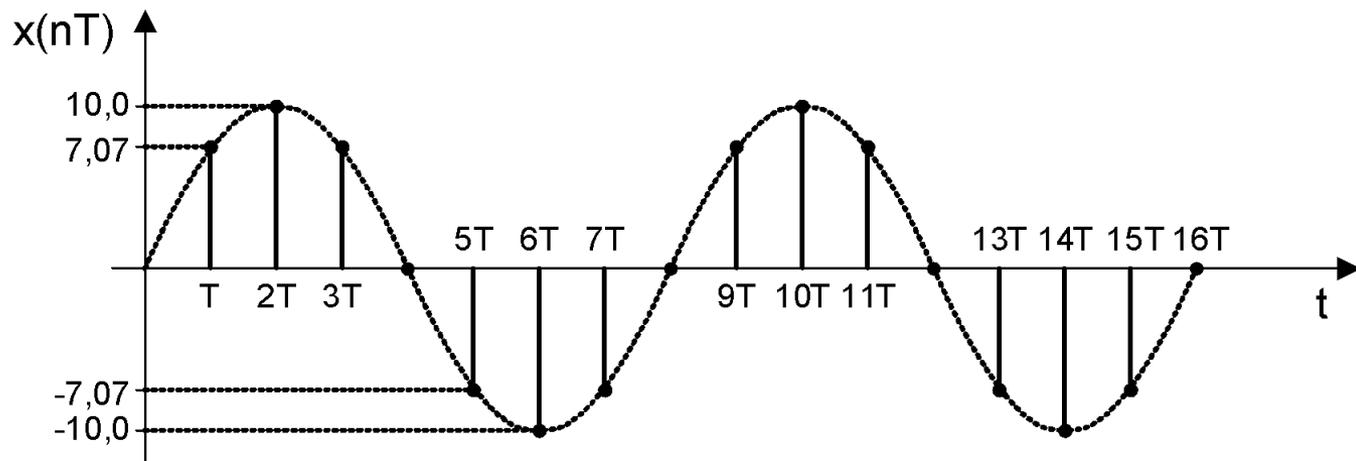
Дискретные сигналы

Дискретные сигналы описываются решётчатыми функциями – последовательностями $x(nT)$, где $T = \text{const}$ – интервал (период) дискретизации, n – целое, $n = 0, 1, 2, \dots$; функция $x(nT)$ может в дискретные моменты времени nT принимать произвольные значения на некотором интервале. Эти значения функции называются *выборками* или *отсчётами* функции.

Пример дискретного сигнала

● Пример последовательности отсчётов функции

$$x(nT) = U_m \sin 2\pi f nT, U_m = 10 \text{ В}, \\ f = 5 \text{ Гц}, T = 0,025 \text{ с}.$$



Цифровые сигналы

Цифровые сигналы представляют собой квантованные по уровню дискретные сигналы и описываются квантованными решётчатыми функциями (квантованными последовательностями) $x_{\text{ц}}(nT)$, принимающими в дискретные моменты времени nT лишь конечный ряд дискретных значений – уровней квантования h_1, h_2, \dots, h_N .

Связь между решётчатой функцией $x(nT)$ и квантованной решётчатой функцией $x_{\text{ц}}(nT)$ определяется нелинейной функцией квантования $x_{\text{ц}}(nT) = F_{\text{к}}(x(nT))$. Существуют различные способы выбора функции квантования.

Простейшая функция квантования

- В простейшем случае – при квантовании с постоянным шагом $q = h_i - h_{i-1} = \text{const}$ – функция квантования имеет вид

$$x_{\text{ц}}(nT) = F_{\text{к}}(x(nT)) = \begin{cases} h_1 & \text{при } x(nT) \leq \frac{h_1 + h_2}{2} \\ h_i & \text{при } \frac{h_{i-1} + h_i}{2} < x(nT) \leq \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \\ h_N & \text{при } x(nT) > \frac{h_{N-1} + h_N}{2} \end{cases}$$

Аналого-цифровое преобразование

Аналого-цифровое преобразование представляет собой совокупность следующих операций:

- **дискретизации** непрерывного сигнала по времени;
- **квантования** дискретных значений сигнала по уровню;
- **кодирования** квантованных дискретных значений сигнала.

Дискретизация сигнала по времени

В процессе *дискретизации* из непрерывного сигнала $x(t)$ берутся отсчёты, которые следуют через определённый временной интервал T , называемый интервалом (периодом) дискретизации.

Интервал дискретизации выбирается в соответствии *теоремой Котельникова (Котельникова-Шеннона)*, согласно которой, если сигнал имеет ограниченный спектр, т. е. все его спектральные составляющие имеют частоты не выше некоторой частоты f_{max} , то для восстановления аналогового сигнала из последовательности его дискретных значений интервал дискретизации должен удовлетворять условию

$$T \leq \frac{1}{2f_{max}}.$$

Получение последовательности отсчетов

Математически переход к последовательности дискретных значений описывается умножением непрерывной функции $x(t)$ на *стробирующую* $r(t)$, имеющую следующий вид:

$$r(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT).$$

δ -функция определяется следующим соотношением

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1, \delta(x) = 0, \forall x \neq 0.$$

Свойство фильтрации δ -функции: для любой непрерывной функции $f(x)$ имеем

$$\int_{R^n} \delta(x - a) f(x) dx = f(a).$$

Получаем:

$$x(t) \cdot r(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) = x(nT).$$

Квантование по уровню

При *квантовании* непрерывной функции (в рассматриваемом случае значения функции непрерывны в дискретные отрезки времени) непрерывное множество значений функции заменяется эквивалентным множеством дискретных значений, в результате чего образуется ступенчатая функция $y(t)$. Переход с одной ступени на другую теоретически происходит в те моменты, когда функция $x(t)$ пересекает уровень посередине расстояния q между соседними уровнями. Он называется разрешённым уровнем, а само расстояние q представляет собой интервал или *шаг квантования*.

При квантовании весь возможный диапазон изменения сигнала (от минимального до максимального значения) делится на $(n - 1)$ равных или неравных шагов.

Уравнение идеального

квантователя

Так как при квантовании любое значение функции $x(t)$ округляется до некоторого ближайшего разрешённого уровня $x_i(t)$, то процесс квантования может быть описан равенством

$$x_i = \text{int} \left(\frac{x}{q} \pm \frac{1}{2} \right) q,$$

которое называется **уравнением идеального квантователя**.

В реальных АЦП устройства сравнения и релейные элементы имеют конечные пороги чувствительности, что приводит к появлению некоторой зоны неопределённости их срабатывания и соответствующей погрешности.

Кодирование уровней

квантования

● **Кодирование** результатов аналого-цифрового преобразования заключается в присвоении каждому уровню квантования определённого цифрового кода.

Каждый уровень квантования кодируется числом (обычно используются двоичные символы «0» и «1»), соответственно квантованные отсчёты $x_{ц}(nT)$ записываются в виде m -разрядных двоичных чисел. Число уровней квантования N и наименьшее число разрядов m двоичных чисел, кодирующих эти уровни, связаны соотношением

$$m = \mathit{int}(\log_2 N),$$

где $\mathit{int}(A)$ – наименьшее целое число, не меньшее числа A .

Определение АЦП

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) являются устройствами, которые принимают входные аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые сигналы, пригодные для обработки микро-процессорами и другими цифровыми устройствами.

Статические параметры АЦП

К статическим параметрам АЦП относятся:

- Разрядность;
- Разрешающая способность;
- Статическая характеристика преобразования;
- Погрешность полной шкалы;
- Погрешность смещения нуля;
- Погрешность нелинейности характеристики;
- Погрешность дифференциальной нелинейности характеристики;
- Монотонность характеристики;
- Непропадание кодов
- Температурная нестабильность.

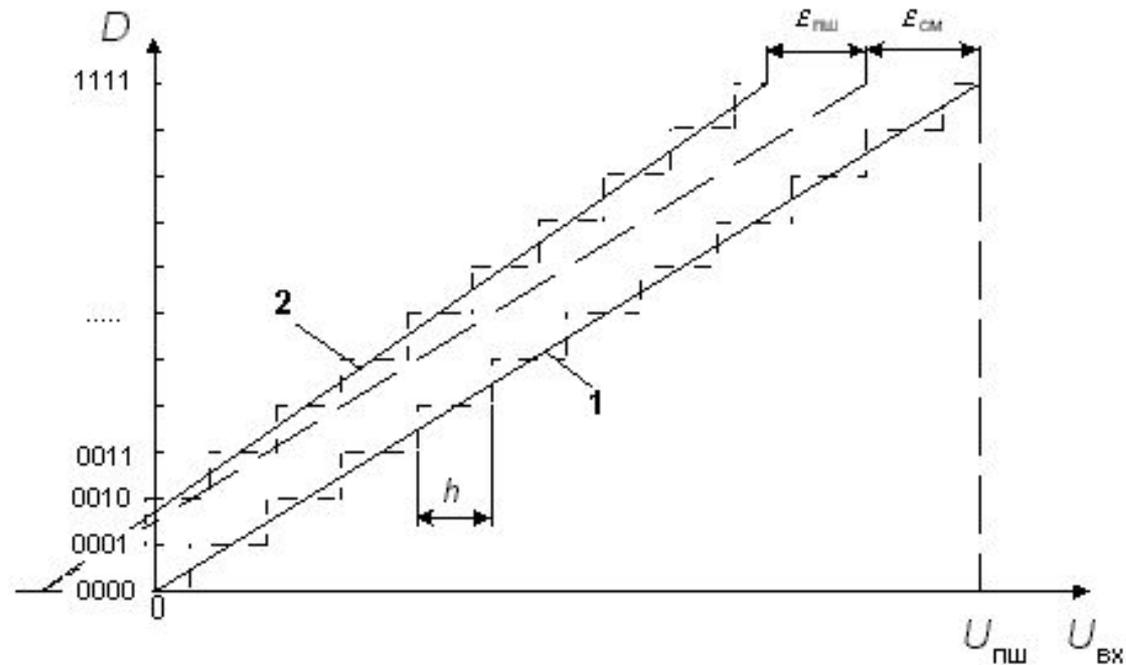
Разрешающая способность

● *Разрешающая способность* – величина, обратная максимальному числу кодовых комбинаций на выходе АЦП. Она выражается в процентах, разрядах или децибелах и характеризует потенциальные возможности АЦП с точки зрения достижимой точности.

Разрешающей способности соответствует приращение входного напряжения АЦП $U_{\text{вх}}$ при изменении D_j на единицу младшего разряда (EMР). Это приращение является шагом квантования. Для двоичных кодов преобразования номинальное значение шага квантования

$$h = \frac{U_{\text{пш}}}{2^N - 1}.$$

Статическая характеристика АЦП



Статическая характеристика преобразования АЦП

1. Идеальная характеристика преобразования
2. Оптимальная характеристика преобразования

Погрешность полной шкалы

● *Погрешность полной шкалы* – относительная разность между реальным и идеальными значениями предела шкалы преобразования при отсутствии смещения нуля.

$$\delta_{\text{пш}} = \frac{\varepsilon_{\text{пш}}}{U_{\text{пш}}} \cdot 100\%$$

Эта погрешность является мультипликативной составляющей полной погрешности. Иногда указывается соответствующим числом ЕМР.

Погрешность смещения нуля

● Погрешность смещения нуля – значение $U_{\text{вх}}$, когда входной код ЦАП равен нулю. Является аддитивной составляющей полной погрешности. Часто указывается в милливольтгах или в процентах от полной шкалы:

$$\delta_{\text{см}} = \frac{\varepsilon_{\text{см}}}{U_{\text{пш}}} \cdot 100\%.$$

Эта погрешность может быть уменьшена либо подстройкой аналоговой части схемы, либо коррекцией вычислительного алгоритма цифровой части устройства.

Нелинейность характеристики

● *Нелинейность* - максимальное отклонение реальной характеристики преобразования $D(U_{ВХ})$ от *оптимальной*. Оптимальная характеристика находится эмпирически так, чтобы минимизировать значение погрешности нелинейности. Нелинейность обычно определяется в относительных единицах:

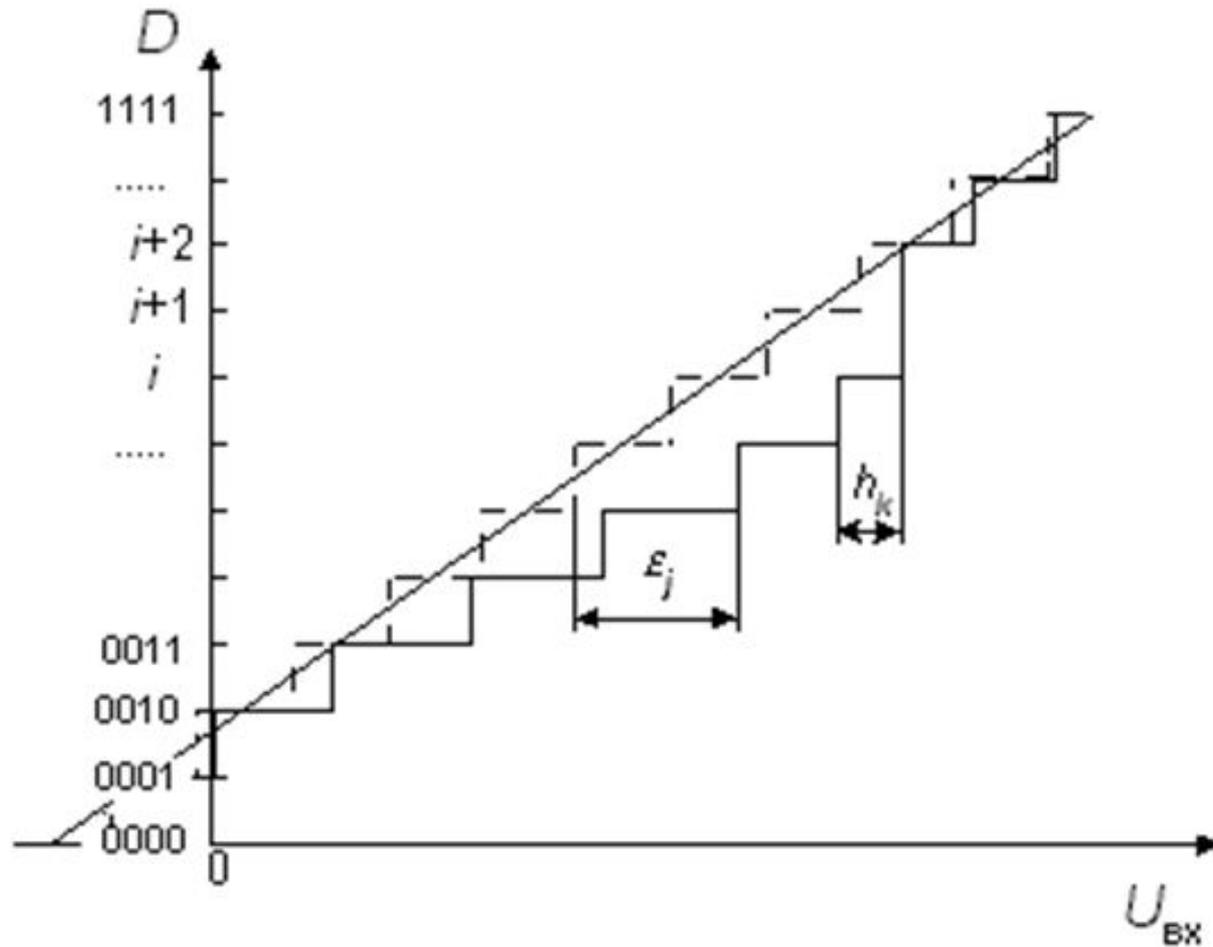
$$\delta_{л} = \frac{\varepsilon_j}{U_{пш}} \cdot 100\%.$$

Дифференциальная нелинейность характеристики

● Дифференциальной нелинейностью АЦП в данной точке k характеристики преобразования называется разность между значением кванта преобразования h_k и средним значением кванта преобразования h . В спецификациях на конкретные АЦП значения дифференциальной нелинейности выражаются в долях ЕМР или процентах от полной шкалы.

$$\delta_{\text{нл}} = \frac{h_k - h}{U_{\text{пш}}} \cdot 100\%.$$

Погрешности линейности статической характеристики преобразования АЦП



Непропадание кодов

Непропадание кодов – свойство АЦП выдавать все возможные выходные коды при изменении входного напряжения от начальной до конечной точки диапазона преобразования. Пример пропадания кода $i+1$ приведен на предыдущем слайде. При нормировании непропадания кодов указывается эквивалентная разрядность АЦП – максимальное количество разрядов АЦП, для которых не пропадают соответствующие им кодовые комбинации.

Монотонность характеристики и температурная нестабильность

Монотонность характеристики преобразования – это неизменность знака приращения выходного кода D при монотонном изменении входного преобразуемого сигнала. **Монотонность не гарантирует малых значений дифференциальной нелинейности и непропадания кодов!!!**

Температурная нестабильность АЦП характеризуется температурными коэффициентами погрешности полной шкалы и погрешности смещения нуля.

Динамические параметры АЦП

Возникновение динамических погрешностей связано с дискретизацией сигналов, изменяющихся во времени. Можно выделить следующие параметры АЦП, определяющие его динамическую точность:

- Максимальная частота дискретизации;
- Время преобразования ($t_{пр}$);
- Время выборки (стробирования).

Максимальная частота дискретизации

Максимальная частота дискретизации (преобразования) – это наибольшая частота, с которой происходит образование выборочных значений сигнала, при которой выбранный параметр АЦП не выходит за заданные пределы. Измеряется числом выборок в секунду. Выбранным параметром может быть, например, монотонность характеристики преобразования или погрешность линейности.

Время преобразования

Время преобразования ($t_{пр}$) - это время, отсчитываемое от начала импульса дискретизации или начала преобразования до появления на выходе устойчивого кода, соответствующего данной выборке. Для одних АЦП, например, последовательного счета или многотактного интегрирования, эта величина является переменной, зависящей от значения входного сигнала, для других, таких как параллельные или последовательно-параллельные АЦП, а также АЦП последовательного приближения, примерно постоянной. При работе АЦП без УВХ время преобразования является апертурным временем.

Время выборки (стробирования)

Время выборки (стробирования) – время, в течение которого происходит образование одного выборочного значения. При работе без УВХ равно времени преобразования АЦП.

Апертурное время

- *Апертурным временем* называют время, в течение которого сохраняется неопределённость между значением выборки и временем, к которому она относится. Эффект апертурной неопределенности проявляется либо как погрешность мгновенного значения сигнала при заданных моментах измерения, либо как погрешность момента времени, в который производится измерение при заданном мгновенном значении сигнала. При равномерной дискретизации следствием апертурной неопределенности является возникновение амплитудных погрешностей, которые называются апертурными и численно равны приращению сигнала в течение апертурного времени.

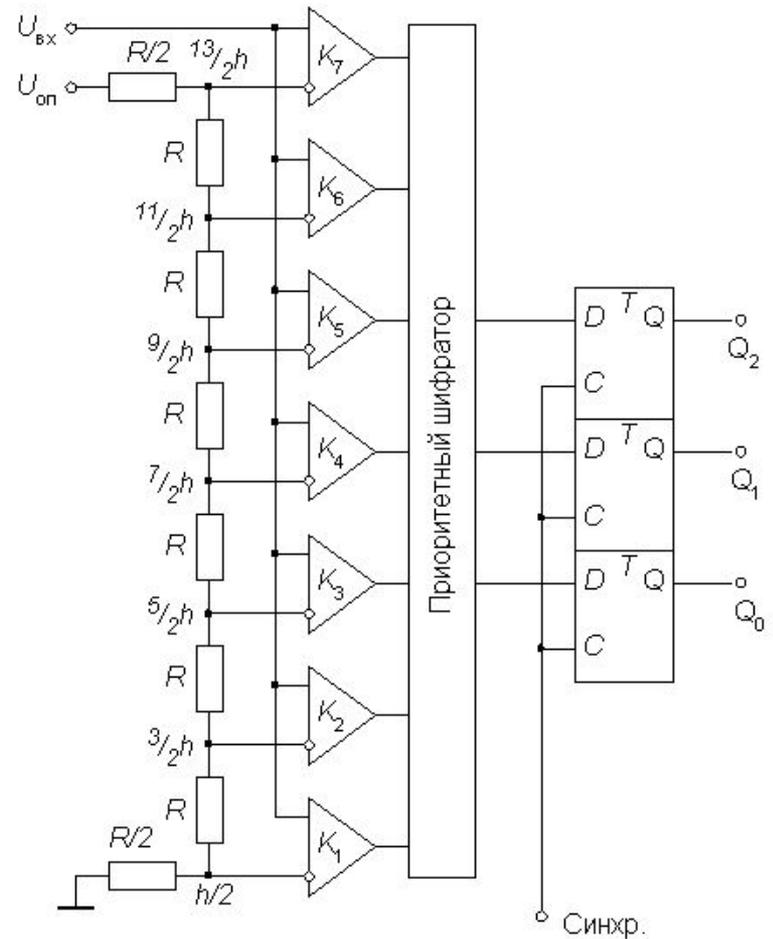
Классификация АЦП



Параллельные АЦП

Такие АЦП производят квантование сигнала по уровню с помощью набора компараторов, включенных параллельно источнику входного сигнала.

Рассмотрим пример параллельного АЦП с тремя разрядами выходного двоичного кода.



Принцип работы АЦП

3 двоичных разряда \Rightarrow можно представить $2^3=8$ чисел от 0 до 7 \Rightarrow необходимо 7 компараторов.

Необходимые опорные напряжения формируются с помощью резистивного делителя.

$h = U_{\text{оп}}/7$ – квант входного напряжения, соответствующий ЕМР.

Если, например, $\frac{5}{2}h \leq U_{\text{вх}} \leq \frac{7}{2}h$, то компараторы с 1-го по 3-й на выходе будут иметь состояние «1», а компараторы с 4-го по 7-й – состояние «0». Преобразование этой группы сигналов в трехзначный двоичный код производится с помощью приоритетного шифратора.

Подключение приоритетного шифратора

Подключение приоритетного шифратора непосредственно к выходу АЦП может привести к ошибочному результату при считывании выходного кода. Рассмотрим, например переход от трёх к четырём, или в двоичном коде от 011 к 100. Если старший разряд вследствие меньшего времени задержки изменит свое состояние раньше других разрядов, то временно на выходе возникнет число 111, т.е. семь. Величина ошибки в этом случае составит половину измеряемого диапазона.

Последовательные АЦП

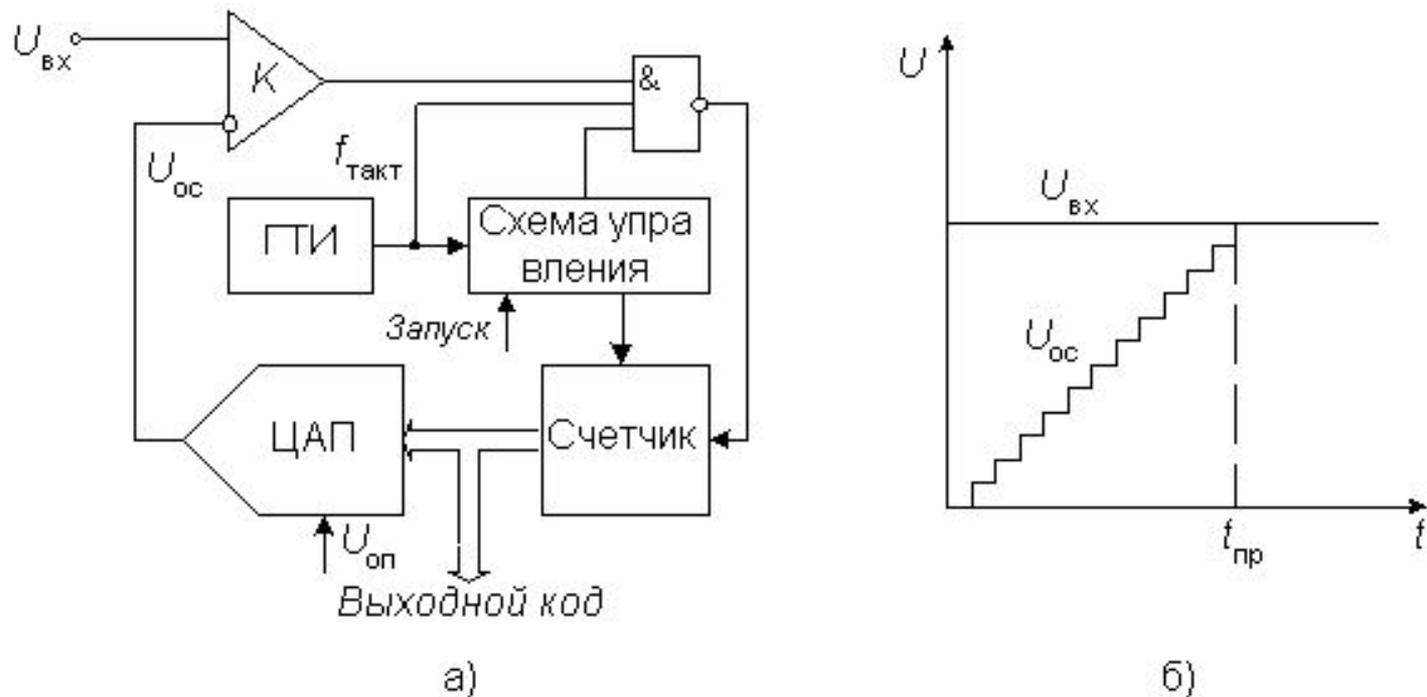
К последовательным АЦП относятся:

- АЦП последовательного счёта (следающие);
- АЦП последовательного приближения;
- Интегрирующие АЦП:
 - Однотактные;
 - Многотактные;
 - Сигма-дельта;
 - Преобразователи напряжение-частота.

АЦП последовательного счёта

Этот преобразователь является типичным примером последовательных АЦП с единичными приближениями и состоит из компаратора, счетчика и ЦАП. На один вход компаратора поступает входной сигнал, а на другой - сигнал обратной связи с ЦАП.

Схема АЦП последовательного счёта и диаграмма его работы



Структурная схема АЦП последовательного счёта

Принцип работы следящего АЦП

Работа преобразователя 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_{oc} .

Процесс преобразования продолжается до тех пор, пока напряжение обратной связи сравняется со входным напряжением и переключится компаратор, который своим выходным сигналом прекратит поступление тактовых импульсов на счетчик.

Переход выхода компаратора из 1 в 0 означает завершение процесса преобразования. Выходной код, пропорциональный входному напряжению *в момент окончания преобразования*, считывается с выхода счетчика.

Время преобразования следящего АЦП

Время преобразования АЦП этого типа является переменным и определяется входным напряжением. Его максимальное значение соответствует максимальному входному напряжению и при разрядности двоичного счетчика N и частоте тактовых импульсов $f_{\text{такт}}$ равно

$$t_{\text{пр.макс}} = (2^N - 1) / f_{\text{такт}}$$

Например, при $N=10$ и $f_{\text{такт}} = 1$ МГц $t_{\text{пр.макс}} = 1024$ мкс, что обеспечивает максимальную частоту выборок порядка 1 кГц.

Погрешность АЦП и его особенности

Статическая погрешность преобразования определяется суммарной статической погрешностью используемых ЦАП и компаратора. Частоту счетных импульсов необходимо выбирать с учетом завершения переходных процессов в них.

При работе без УВХ апертурное время совпадает с временем преобразования. Как следствие, результат преобразования чрезвычайно сильно зависит от пульсаций входного напряжения. При наличии высокочастотных пульсаций среднее значение выходного кода нелинейно зависит от среднего значения входного напряжения. Это означает, что АЦП данного типа без УВХ пригодны для работы с постоянными или медленно изменяющимися напряжениями, которые за время преобразования изменяются не более, чем на значение кванта преобразования.

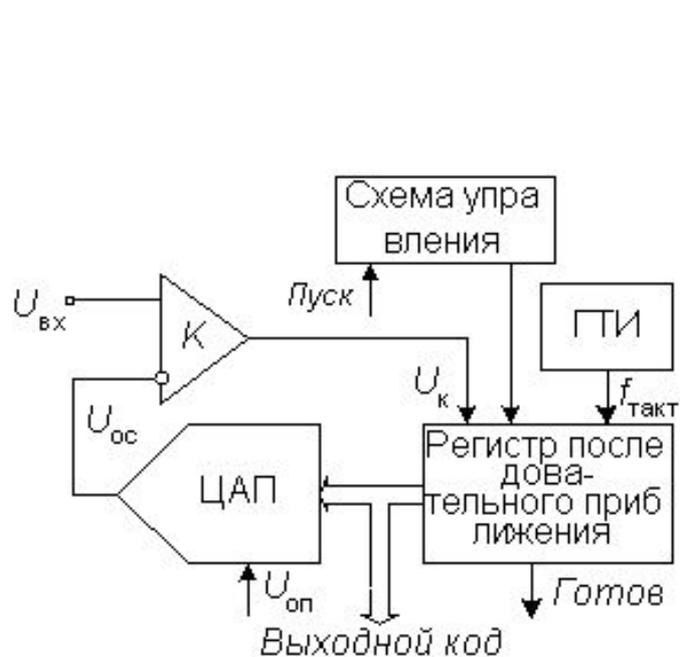
Таким образом, особенностью АЦП последовательного счета является небольшая частота дискретизации, достигающая нескольких килогерц. Достоинством АЦП данного класса является сравнительная простота построения, определяемая последовательным характером выполнения процесса преобразования.

АЦП последовательного приближения

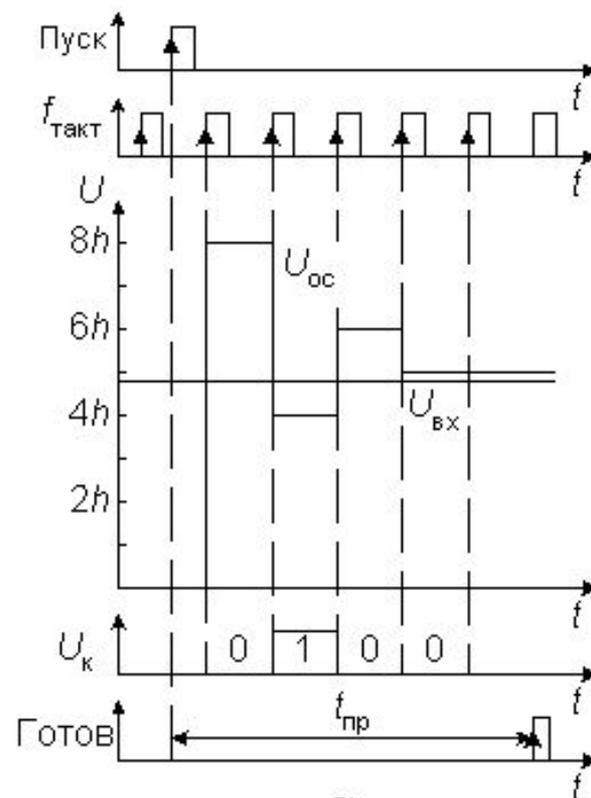
Преобразователь этого типа, называемый в литературе также *АЦП с поразрядным уравниванием*, является наиболее распространенным вариантом последовательных АЦП.

В основе работы этого класса преобразователей лежит принцип *дихотомии*, т.е. последовательного сравнения измеряемой величины с $1/2, 1/4, 1/8$ и т.д. от возможного максимального значения её. Это позволяет для N -разрядного АЦП последовательного приближения выполнить весь процесс преобразования за N последовательных шагов (итераций) вместо $2N-1$ при использовании последовательного счета и получить существенный выигрыш в быстродействии. Так, уже при $N=10$ этот выигрыш достигает 100 раз и позволяет получить с помощью таких АЦП до $10^5 \dots 10^6$ преобразований в секунду. В то же время статическая погрешность этого типа преобразователей, определяемая в основном используемым в нем ЦАП, может быть очень малой, что позволяет реализовать разрешающую способность до 18 двоичных разрядов при частоте выборок до 200 кГц.

Схема и диаграммы работы АЦП последовательного приближения



а)



б)

Структурная схема и временные диаграммы АЦП последовательного приближения

Принцип работы АЦП

последовательного приближения

- Рассмотрим принципы построения и работы АЦП последовательного приближения на примере классической структуры 4-разрядного преобразователя, состоящего из трех основных узлов: компаратора, регистра последовательного приближения (РПП) и ЦАП.
- После подачи команды "Пуск" с приходом первого тактового импульса РПП принудительно задает на вход ЦАП код, равный половине его шкалы (для 4-разрядного ЦАП это $1000_2 = 8_{10}$). Благодаря этому напряжение U_{oc}^2 на выходе ЦАП:
$$U_{oc} = 2^3 h.$$

где h - квант выходного напряжения ЦАП, соответствующий единице младшего разряда (ЕМР).

Принцип работы (2)

Эта величина составляет половину возможного диапазона преобразуемых сигналов. Если входное напряжение больше, чем эта величина, то на выходе компаратора устанавливается **1**, если меньше, то **0**. В этом последнем случае схема управления должна переключить старший разряд d_3 обратно в состояние нуля. Непосредственно вслед за этим остаток

$$U_{вх} - d_3 2^3 h$$

таким же образом сравнивается с ближайшим младшим разрядом и т.д. После четырех подобных выравнивающих шагов в регистре последовательного приближения оказывается двоичное число, из которого после цифро-аналогового преобразования получается напряжение, соответствующее $U_{вх}$ с точностью до 1 ЕМР . Выходное число может быть считано с РПП в виде параллельного двоичного кода по N линиям. Кроме того, в процессе преобразования на выходе компаратора формируется выходное число в виде последовательного кода старшими разрядами вперёд (см. рисунок временных диаграмм АЦП).

Быстродействие АЦП

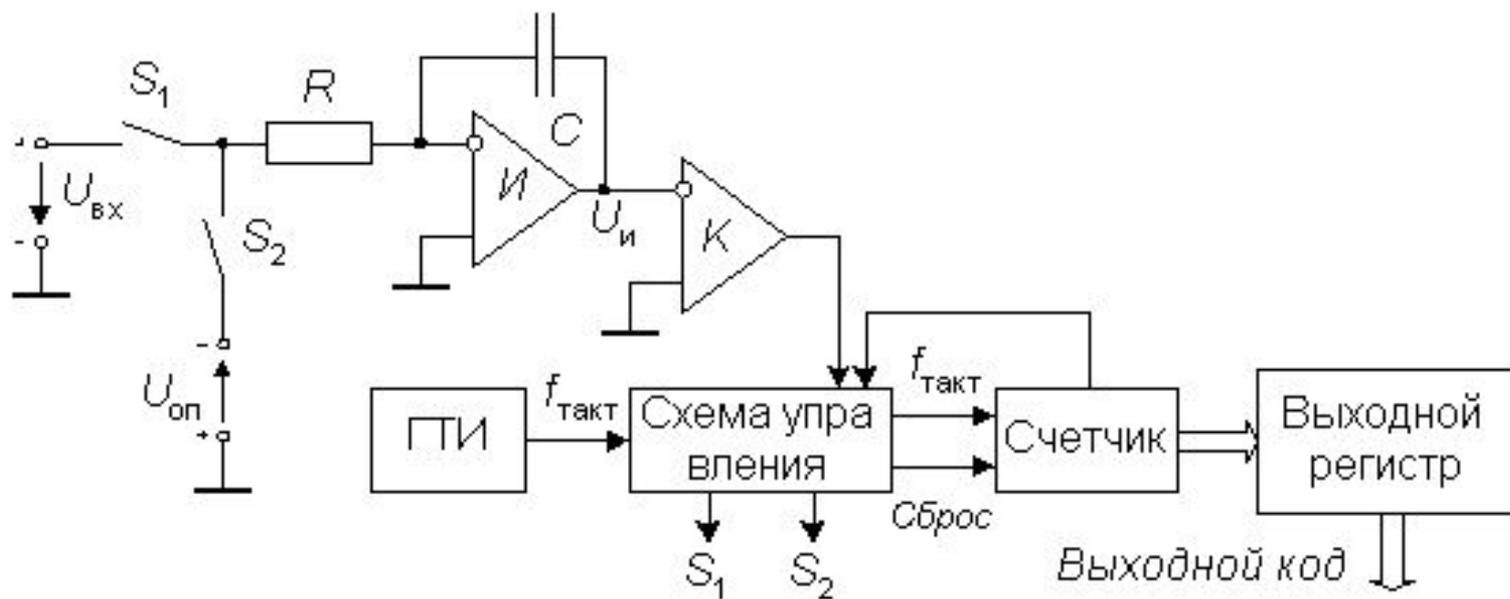
последовательного приближения

Быстродействие АЦП данного типа определяется суммой времени установления ЦАП до установившегося значения с погрешностью, не превышающей $0,5 \text{ ЕМР}$, времени переключения компаратора t_k и задержки распространения сигнала в регистре последовательного приближения t_3 . Сумма $t_k + t_3$ является величиной постоянной, а $t_{\text{уст}}$ уменьшается с уменьшением веса разряда. Следовательно для определения младших разрядов может быть использована более высокая тактовая частота. При поразрядной вариации $f_{\text{такт}}$ возможно уменьшение времени преобразования $t_{\text{пр}}$ на 40%. Для этого в состав АЦП может быть включен контроллер.

Работа АЦП без и с УВХ

При работе без УВХ апертурное время равно времени между началом и фактическим окончанием преобразования, которое так же, как и у АЦП последовательного счета, по сути зависит от входного сигнала, т.е. является переменным. Возникающие при этом апертурные погрешности носят также нелинейный характер. Поэтому для эффективного использования АЦП последовательного приближения, между его входом и источником преобразуемого сигнала следует включать УВХ. Большинство выпускаемых в настоящее время ИМС АЦП последовательного приближения (например, 12-разрядный MAX191, 16-разрядный AD7882 и др.), имеет встроенные УВХ или, чаще, устройства слежения-хранения (track-hold, УСХ), управляемые сигналом запуска АЦП. УСХ отличается тем, что постоянно находится в режиме выборки, переходя в режим хранения только на время преобразования сигнала.

АЦП многотактного интегрирования



Упрощенная схема АЦП двухтактного интегрирования

Принцип работы: стадия интегрирования

● Преобразование проходит две стадии: стадию интегрирования и стадию счета. В начале первой стадии ключ S_1 замкнут, а ключ S_2 разомкнут. Интегратор **И** интегрирует входное напряжение $U_{\text{вх}}$. Время интегрирования входного напряжения t_1 постоянно; в качестве таймера используется счетчик с коэффициентом пересчета $K_{\text{сч}}$, так что

$$t_1 = \frac{K_{\text{сч}}}{f_{\text{ТАКТ}}}$$

Принцип работы: переход между стадиями интегрирования и счета

К моменту окончания интегрирования выходное напряжение интегратора составляет

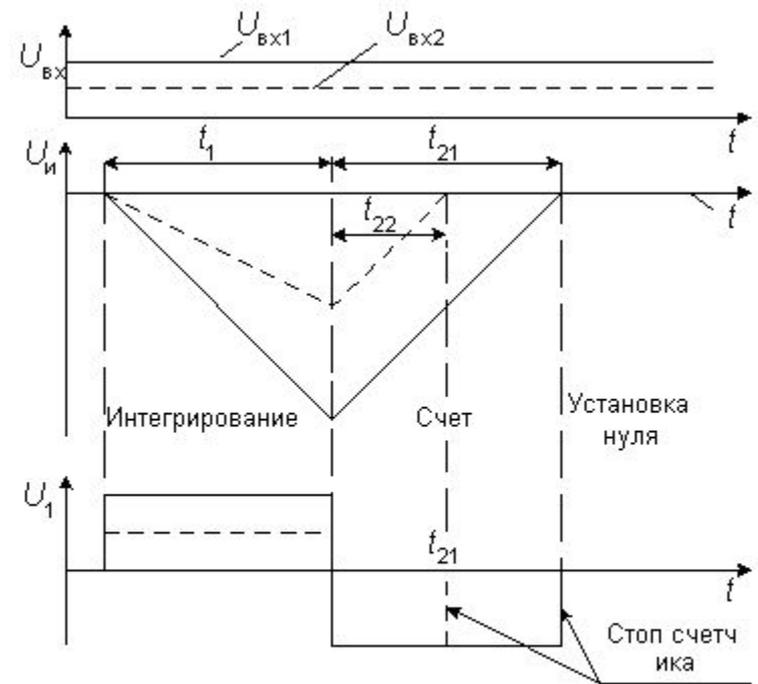
$$U_{И}(t_1) = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} U_{ВХ}(t) dt = -\frac{U_{ВХ.ср} K_{сч}}{f_{ТАКТ} RC}$$

где $U_{ВХ.ср}$ - среднее за время t_1 входное напряжение. После окончания стадии интегрирования ключ S_1 размыкается, а ключ S_2 замыкается и опорное напряжение $U_{оп}$ поступает на вход интегратора. При этом выбирается опорное напряжение, противоположное по знаку входному напряжению. На стадии счета выходное напряжение интегратора линейно уменьшается по абсолютной величине.

Принцип работы: стадия счета

Стадия счета заканчивается, когда выходное напряжение интегратора переходит через нуль. При этом компаратор **К** переключается и счет останавливается. Интервал времени, в котором проходит стадия счета, определяется уравнением

$$U_{и}(t_1) + \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_1+t_2} U_{оп} dt = 0 *$$



Временные диаграммы АЦП двухтактного интегрирования

Получение времени стадии счета

- Подставив значение $U_{и}(t_1)$ в * с учетом того, что

$$t_2 = \frac{n_2}{f_{\text{ТАКТ}}}$$

где n_2 - содержимое счетчика после окончания стадии счета, получим результат

$$n_2 = \frac{U_{\text{ВХ.ср}} K_{\text{сч}}}{U_{\text{ОП}}}$$

Особенность метода

многотактного интегрирования

Из этой формулы следует, что **отличительной особенностью метода многотактного интегрирования** является то, что **ни тактовая частота, ни постоянная интегрирования RC не влияют на результат**. Необходимо только потребовать, чтобы тактовая частота в течение времени $t_1 + t_2$ оставалась постоянной. Это можно обеспечить при использовании простого тактового генератора, поскольку существенные временные или температурные дрейфы частоты происходят за время несопоставимо большее, чем время преобразования.



Следует отметить, что в окончательный результат (формула для n_2) входят не мгновенные значения преобразуемого напряжения, а только значения, усредненные за время t_1 . Поэтому переменное напряжение ослабляется тем сильнее, чем выше его частота!

Интерфейс АЦП

Важную часть АЦП составляет цифровой интерфейс, т.е. схемы, обеспечивающие связь АЦП с приемниками цифровых сигналов. Структура цифрового интерфейса определяет способ подключения АЦП к приемнику выходного кода, например, микропроцессору, микроконтроллеру или цифровому процессору сигналов. Свойства цифрового интерфейса непосредственно влияют на уровень верхней границы частоты преобразования АЦП.

Наиболее часто применяют способ связи АЦП с процессором, при котором АЦП является для процессора как бы одной из ячеек памяти. При этом АЦП имеет необходимое число адресных входов, дешифратор адреса и подключается непосредственно к адресной шине и шине данных процессора. Для этого он обязательно должен иметь выходные каскады с тремя состояниями.

Другое требование совместной работы АЦП с микропроцессорами, называемое программным сопряжением, является общим для любых систем, в которые входят ЭВМ и АЦП. Имеется несколько способов программного сопряжения АЦП с процессорами. Рассмотрим основные.

Принцип считывания данных АЦП по сигналу готовности

Проверка сигнала преобразования. Этот способ состоит

в том, что команда начала преобразования "Пуск" периодически подается на АЦП от таймера. Процессор находится в цикле ожидания от АЦП сигнала окончания преобразования "Готов", после которого выходит из цикла, считывает данные с АЦП и в соответствии с ними приступает либо к следующему преобразованию, либо к выполнению основной программы, а затем вновь входит в цикл ожидания. Здесь АЦП выступает в роли ведущего устройства (master), а процессор - ведомого (slave). Этот способ почти не требует дополнительной аппаратуры, но пригоден только в системах, где процессор не слишком загружен, т.е. длительность обработки данных от АЦП меньше времени преобразования АЦП. Указанный способ позволяет максимально использовать производительность АЦП.

Принцип считывания данных АЦП по сигналу прерывания

Простое прерывание. Выдав команду "Пуск", процессор продолжает работу по основной программе. После окончания преобразования формируется сигнал прерывания, который прерывает в процессоре вычисления и включает процедуру поиска периферийного прибора, пославшего сигнал прерывания. Эта процедура состоит в переборе всех периферийных устройств до тех пор, пока не будет найден нужный. Преимущество этого способа по сравнению с предыдущим проявляется в большем числе преобразований за одно и то же время, если используемый АЦП работает медленно. Если же АЦП быстро-действующий, то этот способ работы может оказаться даже медленнее предыдущего, так как на обработку прерывания требуется значительное время.

Чтение данных АЦП с помощью векторного прерывания и ПДП

Векторное прерывание. Этот способ отличается от предыдущего тем, что вместе с сигналом прерывания посылается и адрес программы обращения к данному АЦП. Следовательно, не нужно перебирать все периферийные приборы.

Прямой доступ к памяти. Здесь также используется прерывание, но в отличие от предыдущих двух способов, управление по системе прерывания передается на специальный интерфейс, который и производит перезапись данных преобразования в память, минуя регистры процессора. Это позволяет сократить длительность прерывания до одного такта. Номера ячеек памяти хранятся адресном регистре интерфейса. Для этой цели выпускаются ИМС контроллеров прямого доступа к памяти.

Способы пересылки и виды интерфейса

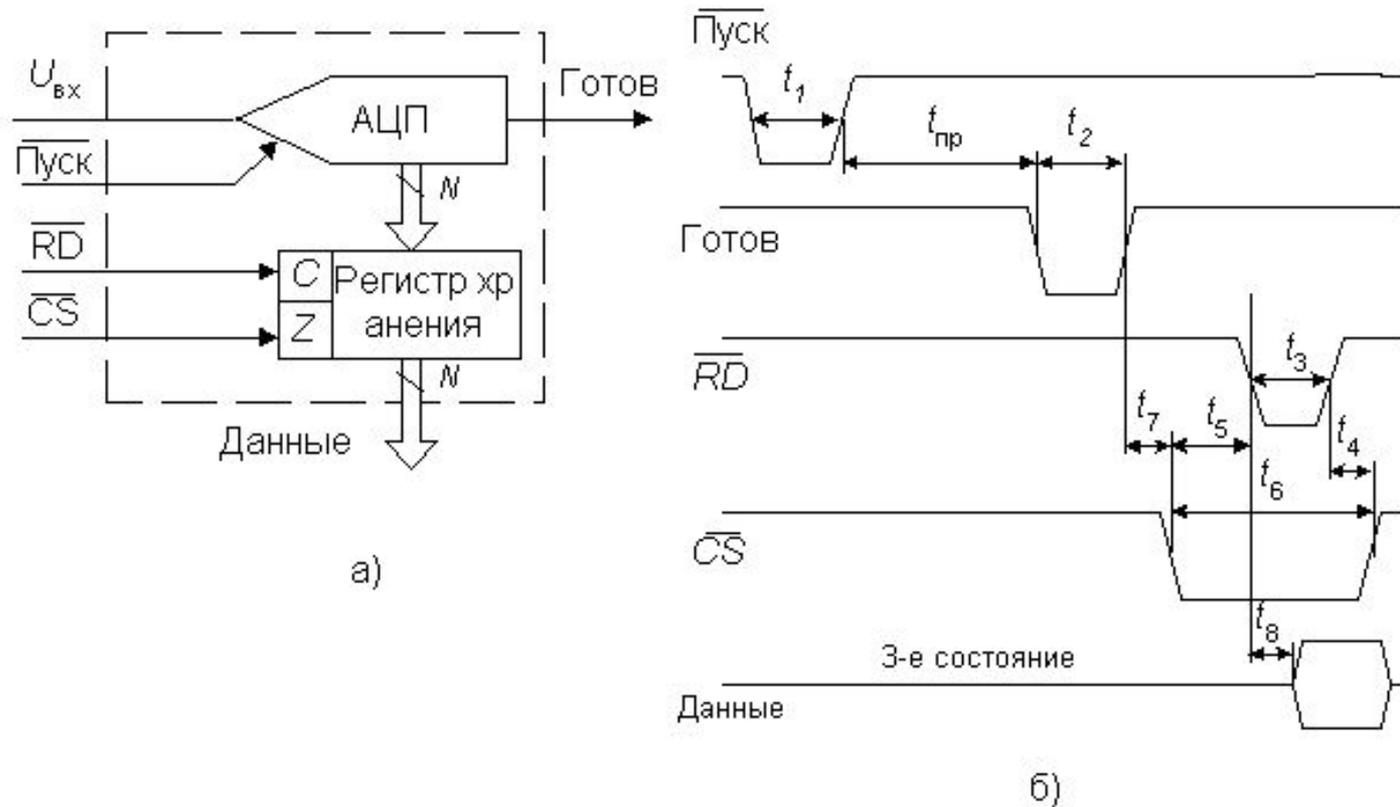
В зависимости от способа пересылки выходного слова из АЦП в цифровой приемник различают преобразователи с последовательным и параллельным интерфейсами выходных данных. Последовательный интерфейс медленнее параллельного, однако он позволяет осуществить связь с цифровым приемником значительно меньшим количеством линий и в несколько раз сократить число выводов ИМС. Поэтому обычно параллельный интерфейс используется в параллельных и последовательно-параллельных АЦП, а последовательный – в интегрирующих. В АЦП последовательного приближения применяются как параллельный (например, I108ПВ2), так и последовательный (например, AD7893) интерфейсы. Некоторые АЦП последовательного приближения (например, AD7892) имеют интерфейс обоих типов.

Параллельный интерфейс

АЦП с параллельным интерфейсом выходных данных. В простейших случаях, характерных для параллельных АЦП и преобразователей ранних моделей, интерфейс осуществляется с помощью N -разрядного регистра хранения, имеющего три состояния выхода. Здесь N - разрядность АЦП.

На нарастающем фронте сигнала "Пуск" УВХ преобразователя переходит в режим хранения и инициируется процесс преобразования. Когда преобразование завершено, на выходную линию "Готов" выводится импульс, что указывает на то, что в выходном регистре АЦП находится новый результат. Сигналы "CS" (выбор кристалла) и "RD" (Чтение) управляют выводом данных для передачи приемнику.

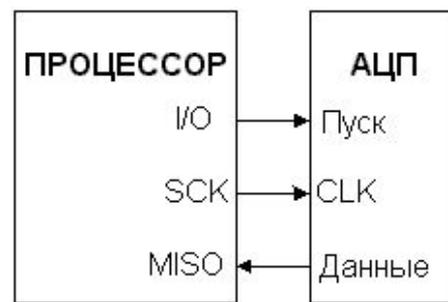
Схема АЦП и диаграммы работы интерфейса



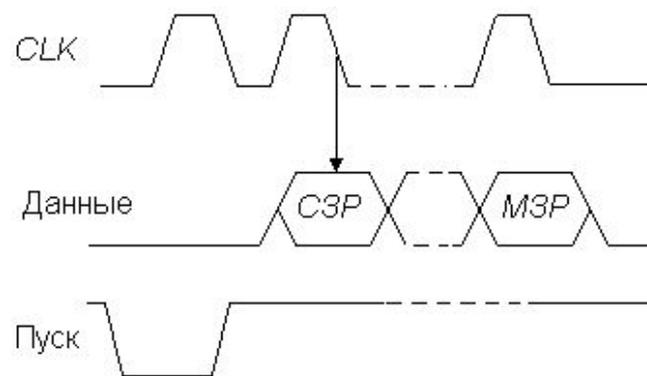
АЦП с параллельным интерфейсом и временные диаграммы его работы

Последовательный интерфейс. Простой вариант

АЦП с последовательным интерфейсом выходных данных. В АЦП последовательного приближения, оснащенных простейшей цифровой частью, таких как 12-битный MAX176 или 14-битный MAX121 выходная величина может быть считана в виде последовательного кода прямо с компаратора или регистра последовательного приближения (РПП).



а)



б)

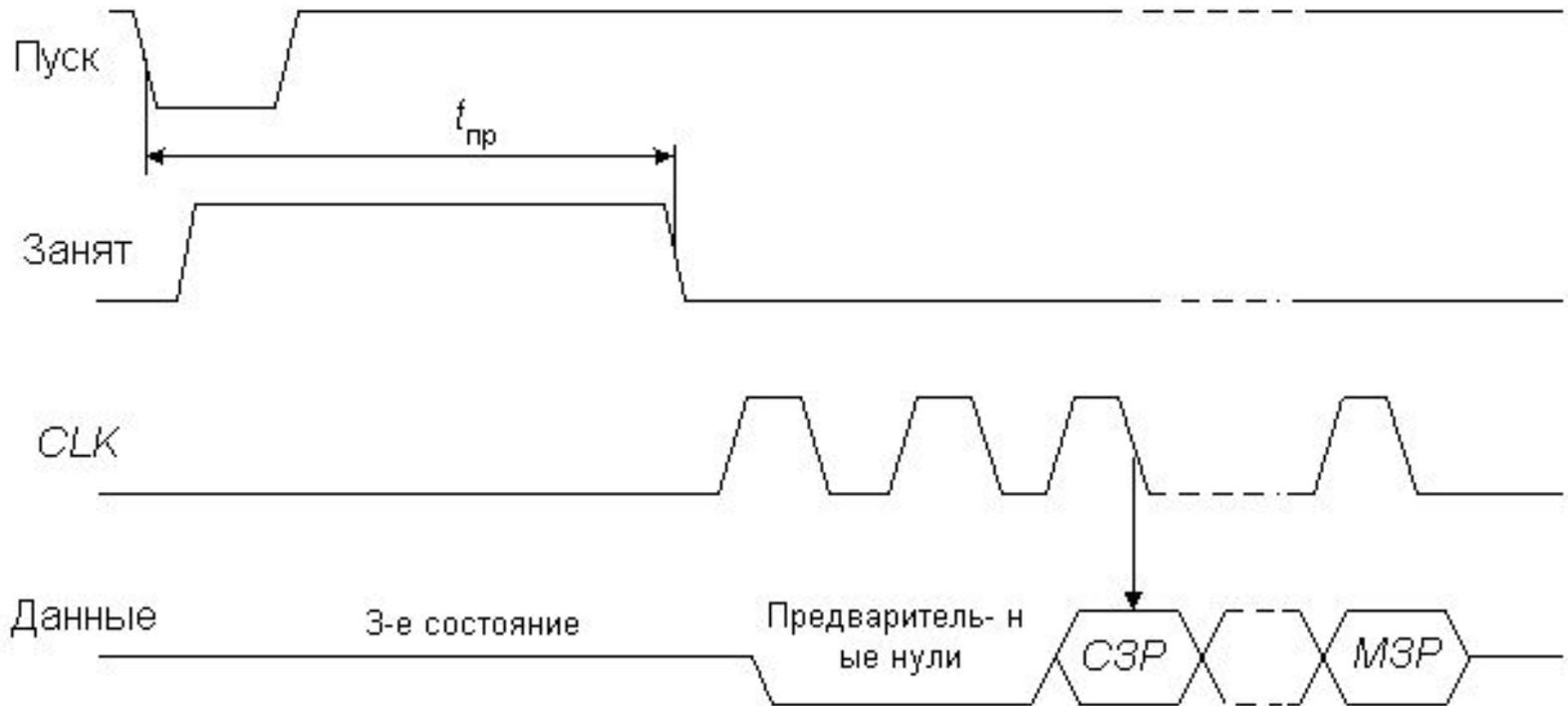
Простейший последовательный интерфейс и временные диаграммы его работы

Принцип работы

последовательного интерфейса

Простейший интерфейс обеспечивает наименьшее время цикла "преобразование - передача данных". Однако он обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, переключение выходных каскадов АЦП во время преобразования приносит импульсную помеху в аналоговую часть преобразователя, что вызывает уменьшение соотношения сигнал/шум (например, для АЦП AD7893 среднеквадратическое значение шума при передаче данных во время преобразования почти в три раза больше, чем при считывании данных после преобразования). Во-вторых, если АЦП имеет большое время преобразования, то процессор будет занят приемом информации от него существенную часть вычислительного цикла. По этим причинам современные модели АЦП с последовательной передачей выходных данных оснащаются выходным сдвиговым регистром, в который загружается результат преобразования из РПП.

Диаграмма работы второго типа последовательного интерфейса



Последовательный интерфейс с передачей данных по окончании преобразования

Работа последовательного интерфейса второго типа

По заднему фронту сигнала "Пуск" УВХ переходит в режим хранения и начинается преобразование. При этом на соответствующем выводе АЦП выставляется сигнал "Занят". По окончании преобразования начинается передача данных. Процессор подает на синхровход АЦП последовательность синхроимпульсов CLK . Если $8 < N \leq 16$, то число синхроимпульсов обычно составляет 16. При $N < 16$ вначале вместо отсутствующих старших битов передаются нули, а затем выходное слово старшими битами вперед. До и после передачи данных выходная линия АЦП находится в высокоимпедансном состоянии.

Увеличение длительности цикла "преобразование - передача данных" по сравнению с простейшим интерфейсом обычно несущественно, так как синхроимпульсы могут иметь большую частоту.

Шумы АЦП (I)

В идеале, повторяющиеся преобразования фиксированного постоянного входного сигнала должны давать один и тот же выходной код. Однако, вследствие неизбежного шума в схемах АЦП, существует некоторый диапазон выходных кодов для заданного входного напряжения. Если подать на вход АЦП постоянный сигнал и записать большое число преобразований, то в результате получится некоторое распределение кодов.

Шумы АЦП (2)

Если подогнать Гауссовское распределение к полученной гистограмме, то стандартное отклонение будет примерно эквивалентно среднеквадратическому значению входного шума АЦП.

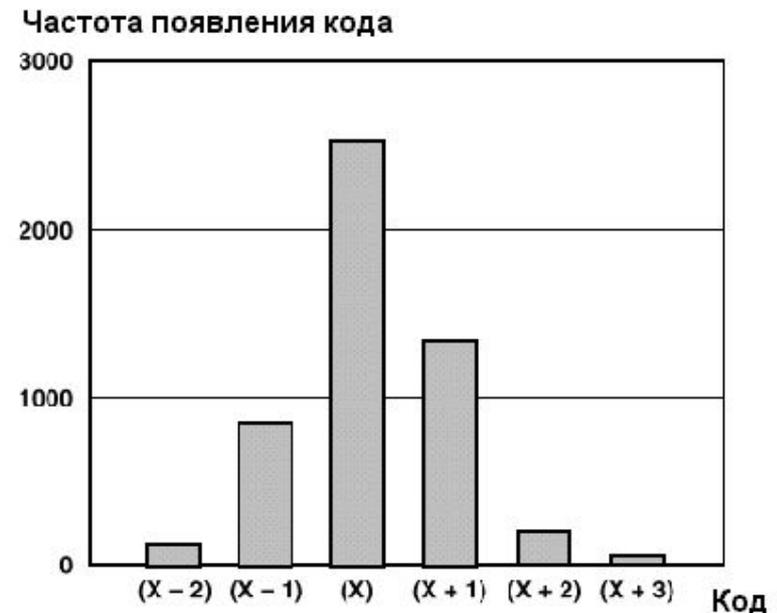
В качестве примера на следующем слайде приведена гистограмма результатов 5000 преобразований постоянного входного сигнала, выполненных 16-разрядным двухтактным последовательно-параллельным АЦП AD7884.

Шумы АЦП (3)

Входное напряжение из диапазона +5 В было установлено по возможности ближе к центру кода.

Как видно из гистограммы, все результаты преобразований распределены на шесть кодов.

Среднеквадратическое значение шума, соответствующее этой гистограмме, равно 120 мкВ.



Гистограмма результатов преобразования АЦП AD7884



Интервал (период) дискретизации

● Интервал дискретизации выбирается в соответствии *теоремой Котельникова*, согласно которой, если сигнал имеет ограниченный спектр, т. е. все его спектральные составляющие имеют частоты не выше некоторой частоты f_{max} , то для восстановления аналогового сигнала из последовательности его дискретных значений интервал дискретизации должен удовлетворять условию

$$T \leq \frac{1}{2f_{max}}.$$