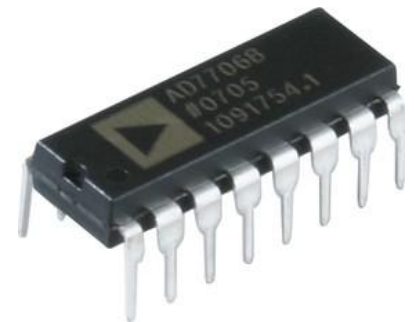


# Микропроцессорная техника в приборах, системах и комплексах

## 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).

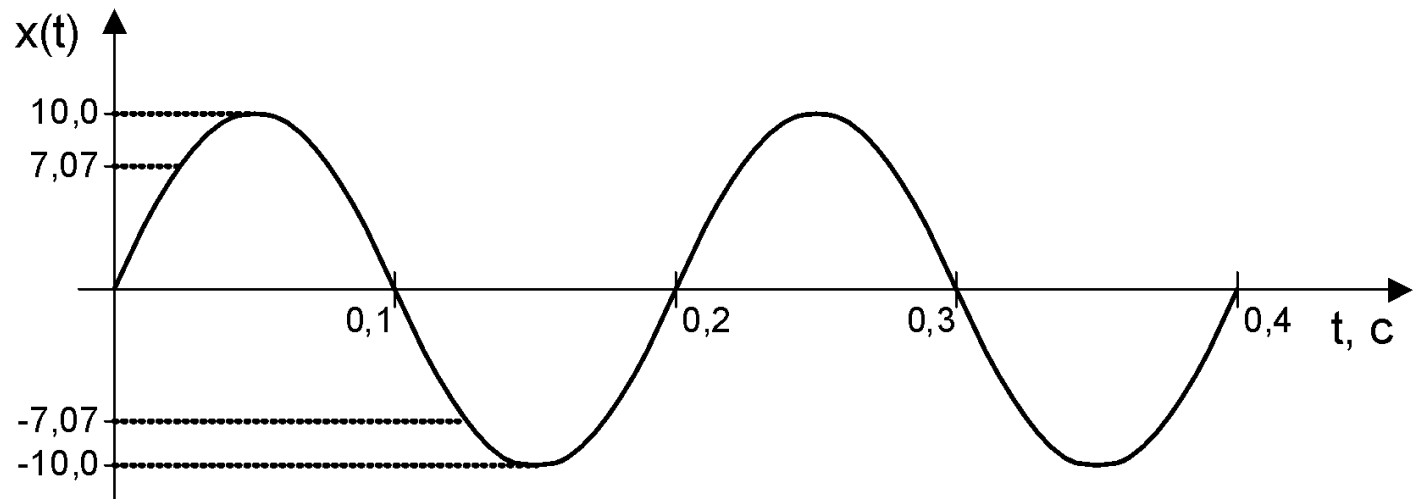
# Аналоговые сигналы

*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:

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



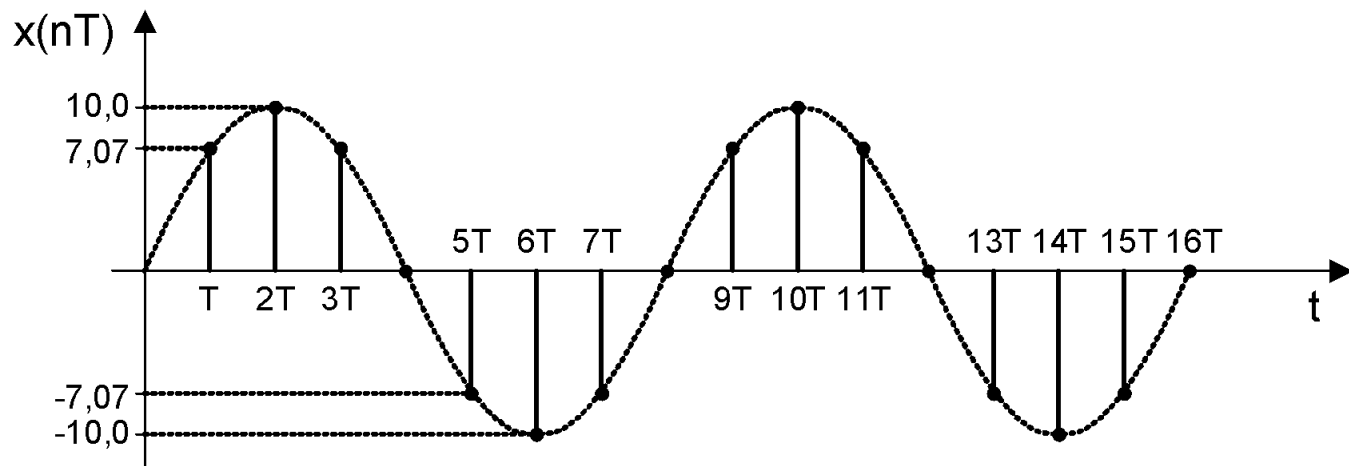
# Дискретные сигналы

*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 (Найквиста-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 без потерь 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:

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

где  $\delta$ -функция определяется следующим соотношением

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

Свойство фильтрации  $\delta$ -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;
- Диапазон входного аналогового сигнала;
- Разрешающая способность;
- Статическая характеристика преобразования;
- Погрешность полной шкалы;
- Погрешность смещения нуля;
- Погрешность нелинейности характеристики;
- Погрешность дифференциальной нелинейности характеристики;
- Монотонность характеристики;
- Непропадание кодов
- Температурная нестабильность.



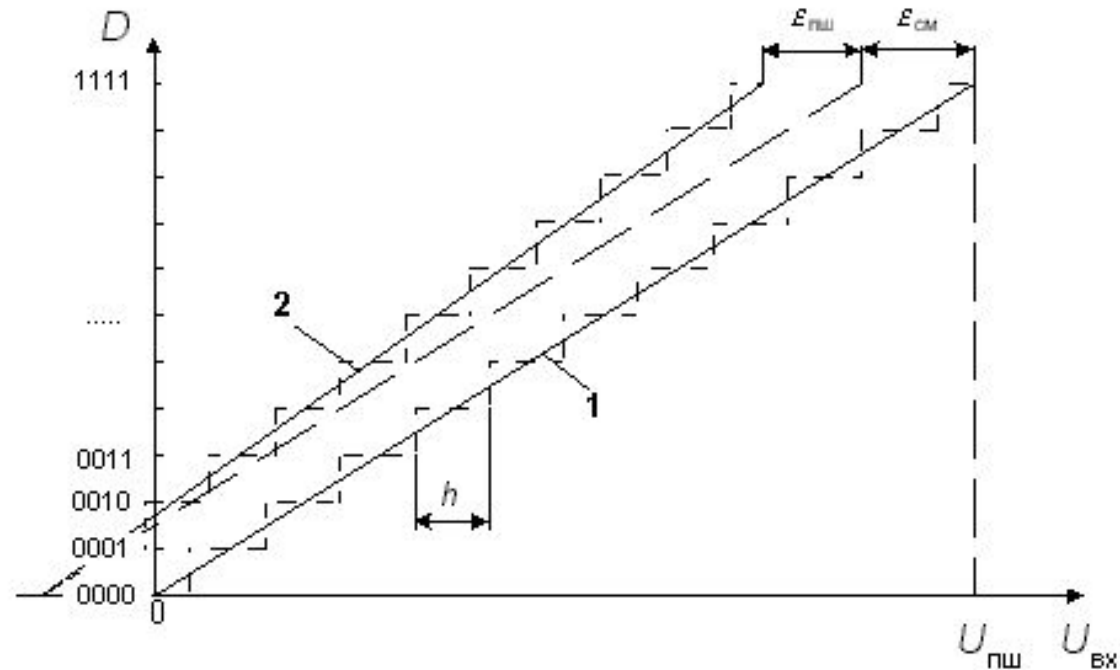
# Разрешающая способность

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:

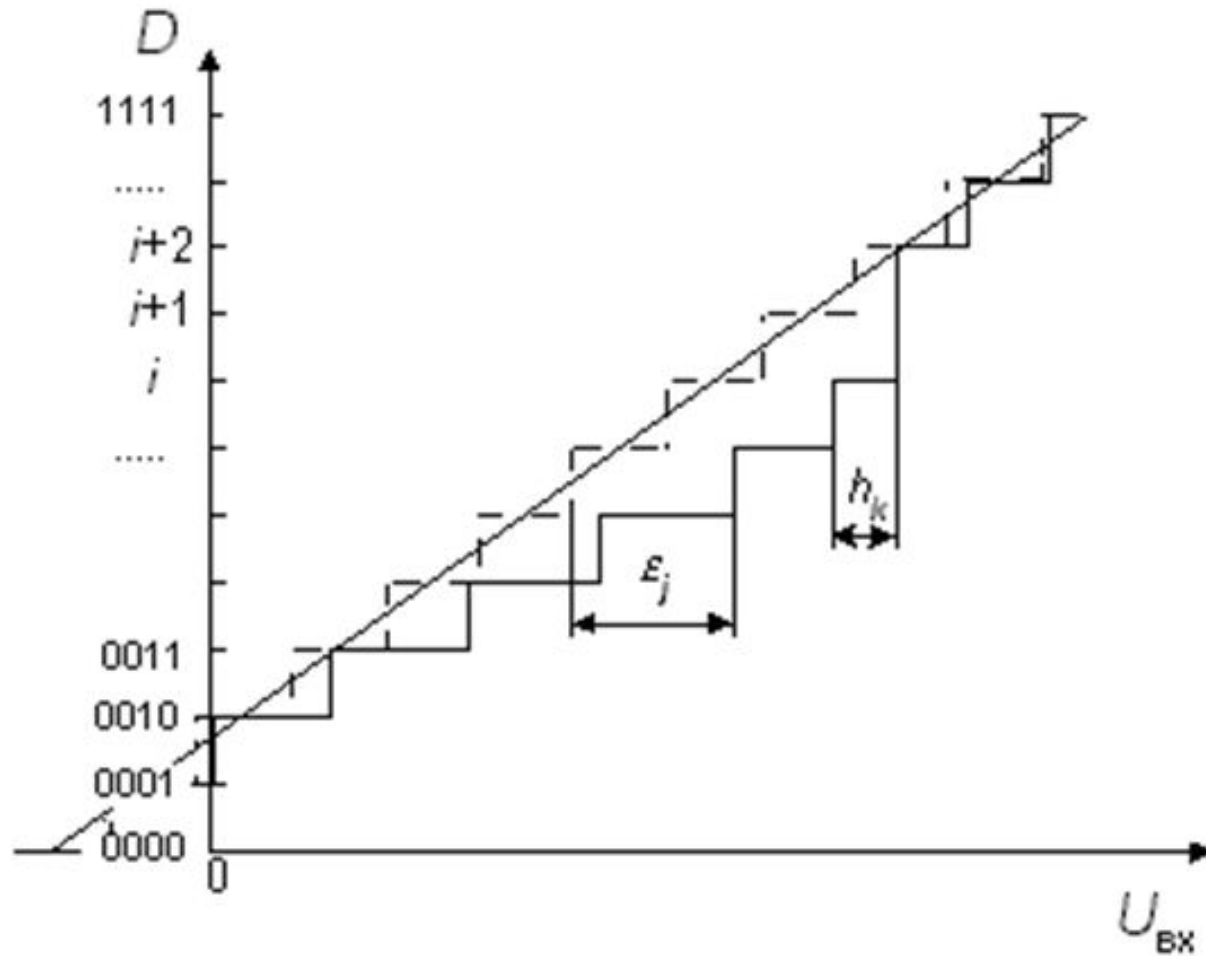
$$\delta_{л} = \frac{\varepsilon_j}{U_{пш}} \cdot 100\%.$$

# 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

Апертурное время – время, в течение которого сохраняется неопределенность между значением выборки и временем, к которому она относится. Эффект неопределенности проявляется либо как погрешность мгновенного значения сигнала при заданных моментах измерения, либо как погрешность момента времени измерения при заданном мгновенном значении сигнала.

Апертурная погрешность в первом приближении

$$\Delta V_A(t_i) \approx t_A V(t_i),$$

где  $t_A$  – апертурное время, примерно равное времени преобразования АЦП.

Для синусоидального сигнала  $V(t) = V_{\max} \sin(\omega t)$  максимальное относительное значение апертурной погрешности

$$\Delta V_A / V_{\max} = \omega t_A.$$

Если для  $N$ -разрядного АЦП с разрешением  $2^{-N}$  апертурная погрешность не должна превышать шага квантования, тогда

$$1/2^N = \omega t_A.$$

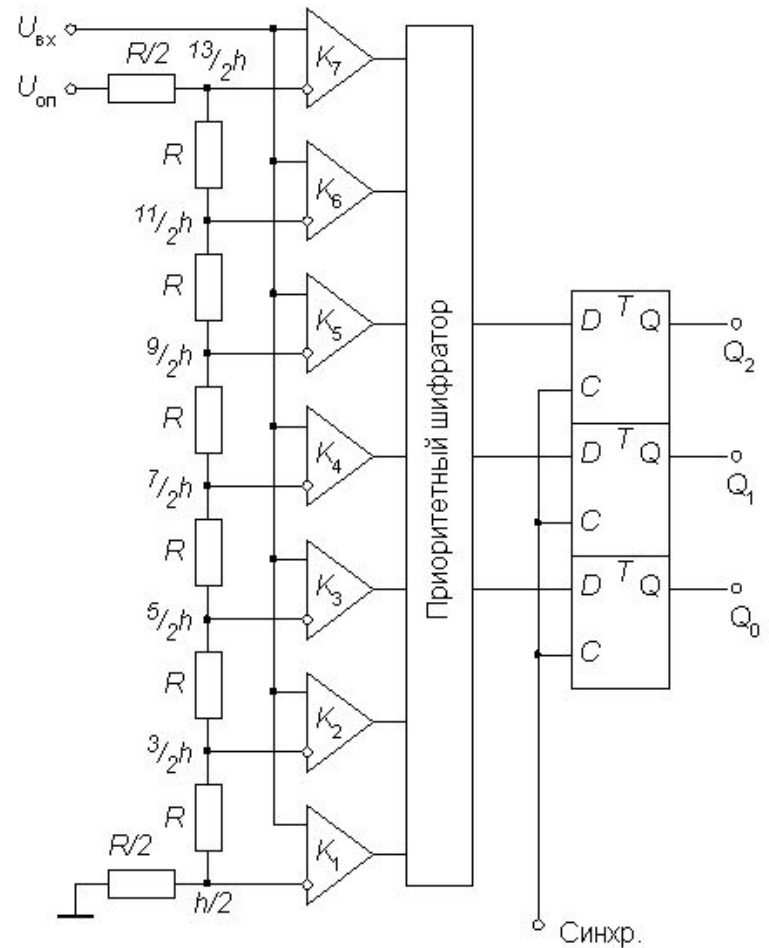
# Классификация АЦП



# 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.

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

Если, например,  $\frac{5}{2}h \leq U_{вх} \leq \frac{7}{2}h$ , 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.

# Диаграмма состояний приоритетного шифратора

Входное напряжение	Состояние компараторов							Выходы		
$U_{ВХ} / h$	$K_7$	$K_6$	$K_5$	$K_4$	$K_3$	$K_2$	$K_1$	$Q_2$	$Q_1$	$Q_0$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
3	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
5	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

# Подключение приоритетного шифратора

Подключение приоритетного шифратора непосредственно к выходу АЦП может привести к ошибочному результату при считывании выходного кода. Рассмотрим, например, переход от трех к четырем, 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.

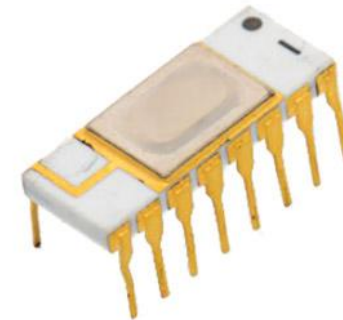
# Точность параллельных АЦП

Так как результаты АЦ-преобразования записываются, как правило, в запоминающее устройство, существует вероятность получить полностью неверную величину. Решить эту проблему можно, например, с помощью устройства выборки-хранения (УВХ). Некоторые интегральные микросхемы (ИМС) параллельных АЦП, например МАХ100, снабжаются сверхскоростными УВХ, имеющими время выборки порядка 0,1 нс. Другой путь состоит в использовании кода Грея, характерной особенностью которого является изменение только одной кодовой позиции при переходе от одного кодового значения к другому. Наконец, в некоторых АЦП (например, МАХ1151) для снижения вероятности сбоев при параллельном АЦ-преобразовании используется двухтактный цикл, когда сначала состояния выходов компараторов фиксируются, а затем, после установления состояния приоритетного шифратора, подачей активного фронта на синхровход выходного регистра в него записывают выходное слово АЦП.

# Примеры параллельных АЦП



Произв-ль – Computer Labs, US  
Модель – VHS-630  
Год выпуска – 1970  
Разрядность – 6 бит  
Скорость – 30 MSPS  
Кол-во компараторов – 64  
Потр. мощность – 100 Вт



19,5x7,5x10,5 мм

Произв-ль – СССР/Россия  
Модель – КИ107ПВ3  
Год выпуска – ~1986-199...  
Разрядность – 6 бит  
Скорость – 100 MSPS  
Кол-во компараторов – 64  
Потр. мощность – 300 мВт

# Последовательно-параллельные АЦП

Последовательно-параллельные АЦП являются компромиссом между стремлением получить высокое быстродействие и желанием сделать это по возможности меньшей ценой. Последовательно-параллельные АЦП занимают промежуточное положение по разрешающей способности и быстродействию между параллельными АЦП и АЦП последовательного приближения.

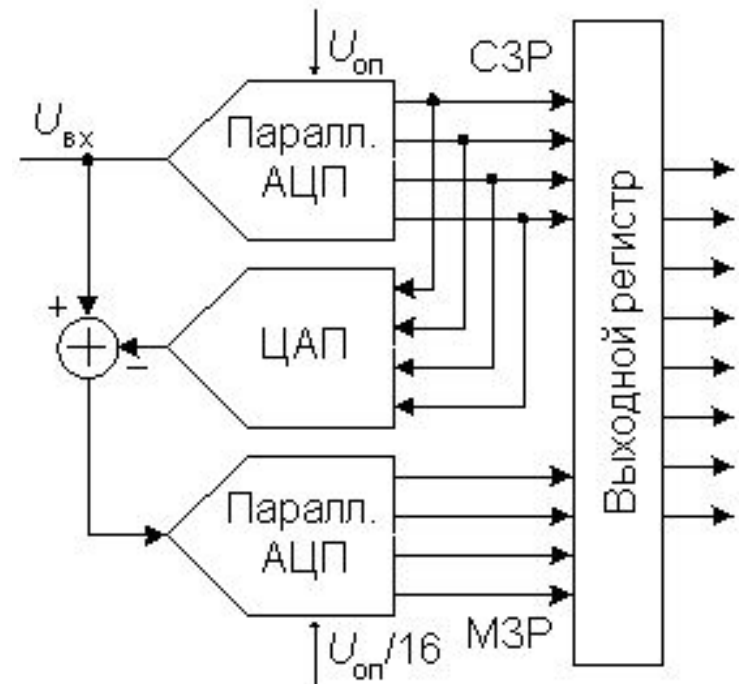
Последовательно-параллельные АЦП подразделяют на:

- Многоступенчатые;
- Многотактные;
- Конвейерные.

# Многоступенчатый АЦП

В многоступенчатом АЦП процесс преобразования входного сигнала разделен в пространстве.

В качестве примера справа представлена схема двухступенчатого 8-разрядного АЦП.



# Принцип работы

## многоступенчатого АЦП

Верхний по схеме АЦП осуществляет грубое преобразование сигнала в четыре старших разряда выходного кода. Цифровые сигналы с выхода АЦП поступают на выходной регистр и одновременно на вход 4-разрядного быстродействующего ЦАП. Во многих ИМС многоступенчатых АЦП (AD9042, AD9070 и др.) этот ЦАП выполнен по схеме суммирования токов на дифференциальных переключателях, но некоторые (AD775, AD9040A и др.) содержат ЦАП с суммированием напряжений. Остаток от вычитания выходного напряжения ЦАП из входного напряжения схемы поступает на вход АЦП2, опорное напряжение которого в 16 раз меньше, чем у АЦП1. Как следствие, квант АЦП2 в 16 раз меньше кванта АЦП1. Этот остаток, преобразованный АЦП2 в цифровую форму представляет собой четыре младших разряда выходного кода. Различие между АЦП1 и АЦП2 заключается прежде всего в требовании к точности: у АЦП1 точность должна быть такой же как у 8-разрядного преобразователя, в то время как АЦП2 может иметь точность 4-разрядного.

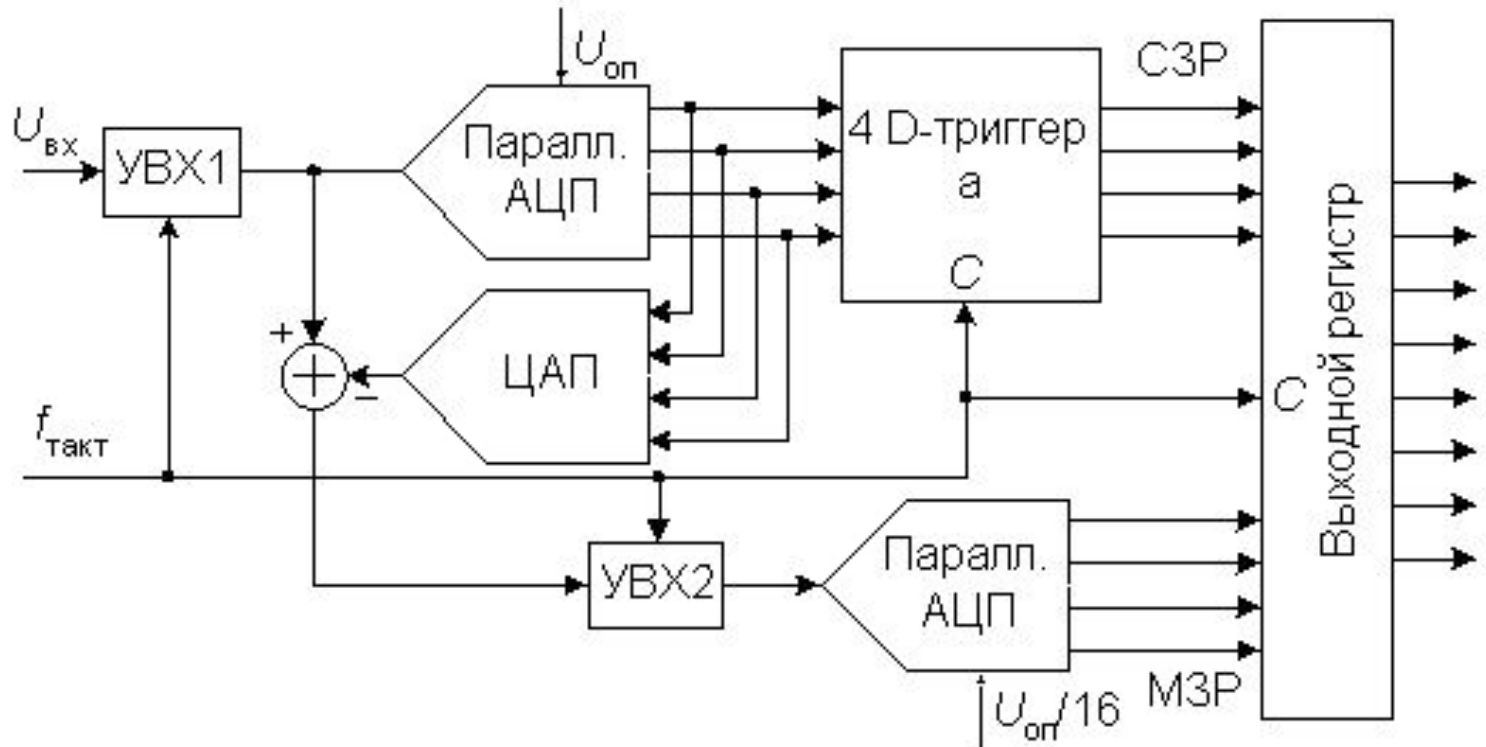
Грубо приближенная и точная величины должны, естественно, соответствовать одному и тому же входному напряжению  $U_{вх}(t_j)$ . Из-за наличия задержки сигнала в первой ступени возникает, однако, временное запаздывание. Поэтому при использовании этого способа входное напряжение необходимо поддерживать постоянным с помощью устройства выборки-хранения до тех пор, пока не будет получено все число.



# Конвейерный АЦП

Быстродействие многоступенчатого АЦП можно повысить, применив конвейерный принцип многоступенчатой обработки входного сигнала. В обыкновенном многоступенчатом АЦП (см. рисунок в одноимённом разделе) вначале происходит формирование старших разрядов выходного слова преобразователем АЦП<sub>1</sub>, а затем идет период установления выходного сигнала ЦАП. На этом интервале АЦП<sub>2</sub> простаивает. На втором этапе во время преобразования остатка преобразователем АЦП<sub>2</sub> простаивает АЦП<sub>1</sub>. Введя элементы задержки аналогового и цифрового сигналов между ступенями преобразователя, получим конвейерный АЦП.

# Схема конвейерного АЦП



Структурная схема 8-разрядного конвейерного АЦП

# Диаграмма работы конвейерного АЦП

Роль аналогового элемента задержки выполняет устройство выборки-хранения УВХ2, а цифрового - четыре D-триггера. Триггеры задерживают передачу старшего полубайта в выходной регистр на один период тактового сигнала  $CLK$ .

Сигналы выборки, формируемые из тактового сигнала, поступают на УВХ1 и УВХ2 в разные моменты времени (см. рисунок справа).

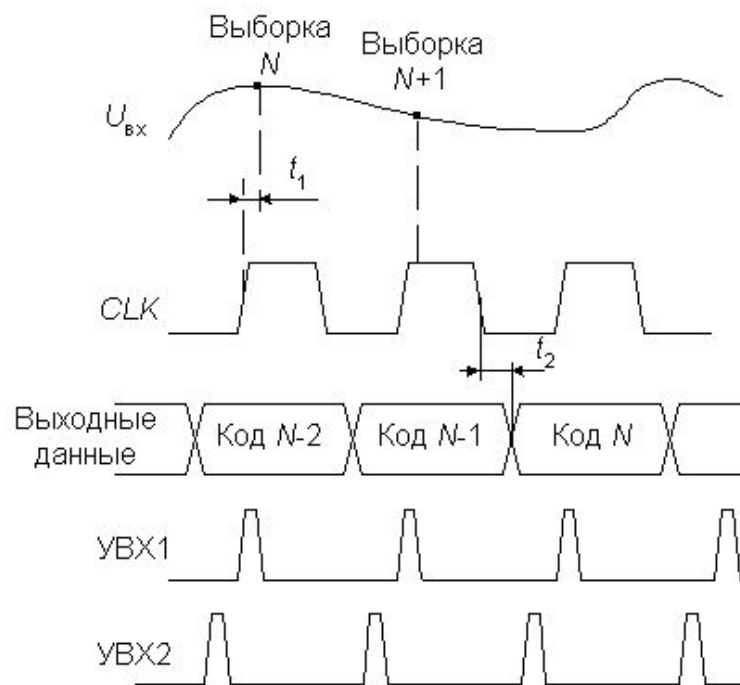


Диаграмма работы конвейерного АЦП

# Преимущества конвейерного АЦП

Таким образом, конвейерная архитектура позволяет существенно (в несколько раз) повысить максимальную частоту выборок многоступенчатого АЦП. То, что при этом сохраняется суммарная задержка прохождения сигнала, соответствующая обычному многоступенчатому АЦП с равным числом ступеней, не имеет существенного значения, так как время последующей цифровой обработки этих сигналов всё равно многократно превосходит эту задержку. За счет этого можно без проигрыша в быстродействии увеличить число ступеней АЦП, понизив разрядность каждой ступени. В свою очередь, увеличение числа ступеней преобразования уменьшает сложность АЦП.

Например, для построения 12-разрядного АЦП из четырех 3-разрядных необходимо 28 компараторов, тогда как его реализация из двух 6-разрядных потребует 126 компараторов.

# Примеры конвейерных АЦП

Конвейерную архитектуру имеет большое количество выпускаемых в настоящее время многоступенчатых АЦП. В частности, 2-ступенчатый 10-разрядный AD9040A, выполняющий до 40 млн. преобразований в секунду (МПс), 4-ступенчатый 12-разрядный AD9220 (10 МПс), потребляющий всего 250 мВт, и др.

При выборе конвейерного АЦП следует иметь в виду, что многие из них не допускают работу с низкой частотой выборок. Например, изготовитель не рекомендует работу ИМС AD9040A с частотой преобразований менее 10 МПс, 3-ступенчатого 12-разрядного AD9022 с частотой менее 2 МПс и т.д. Это вызвано тем, что внутренние УВХ имеют довольно высокую скорость разряда конденсаторов хранения, поэтому работа с большим тактовым периодом приводит к значительному изменению преобразуемого сигнала в ходе преобразования.

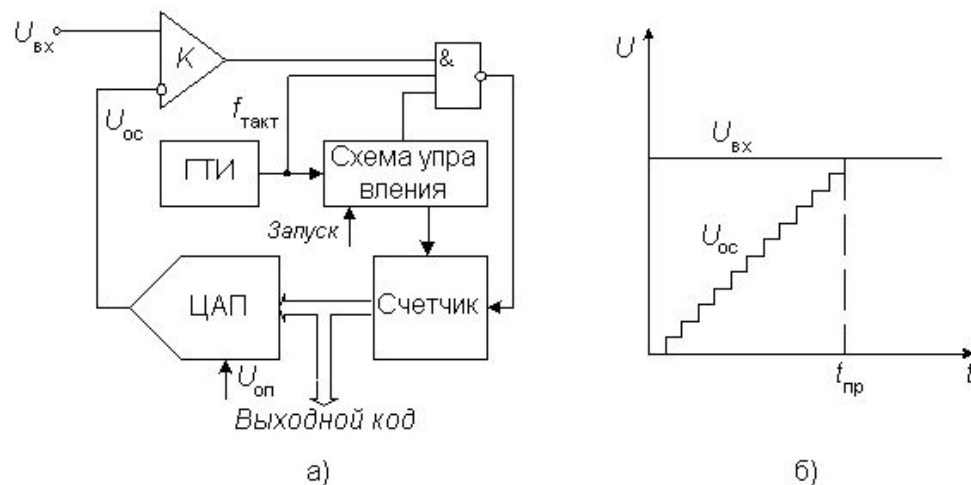
# Последовательные АЦП

К последовательным АЦП относятся:

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

# Следящий АЦП (I)

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.



Структурная схема АЦП последовательного счета

## Следящий АЦП (2)

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  $U_{ос}$ .

Процесс преобразования продолжается до тех пор, пока  $U_{ос}$  сравнивается с  $U_{вх}$  и переключится компаратор, который своим  $^{вх}$  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.



## Следящий АЦП (3)

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.

# Следящий АЦП (4)

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.

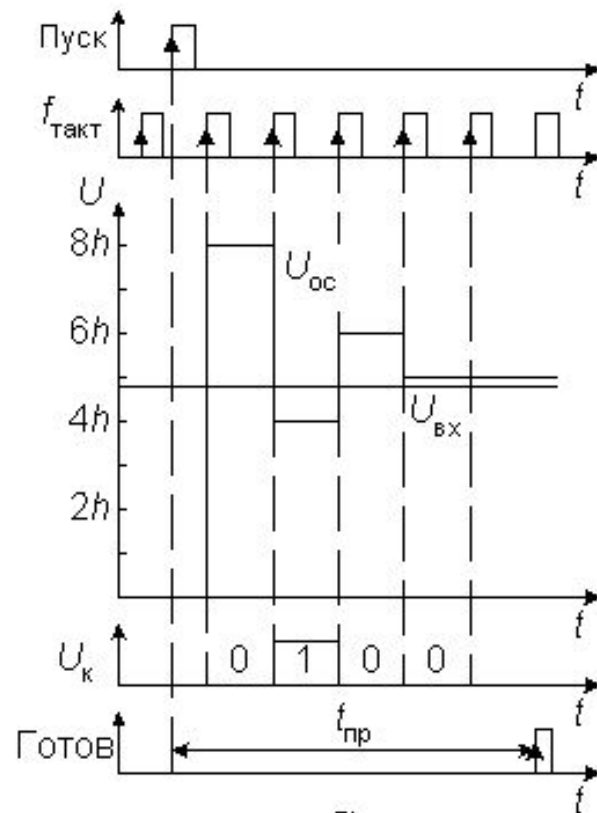
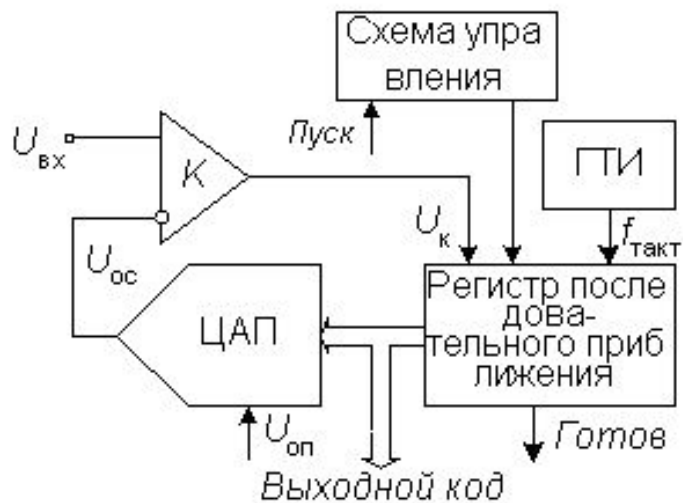
Таким образом, особенностью АЦП последовательного счета является небольшая частота дискретизации, достигающая нескольких кГц. Достоинством АЦП данного класса является сравнительная простота построения, определяемая последовательным характером выполнения процесса преобразования.

# АЦП последовательного приближения (I)

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  $10^5...10^6$  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.

# АЦП последовательного приближения (2)



а)

б)

Структурная схема и временные диаграммы АЦП последовательного приближения

# АЦП последовательного приближения (3)

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  $d3$  обратно в состояние нуля. Далее в РПП устанавливается в **1** следующий по старшинству разряд  $d2$ , и процесс повторяется.

Таким образом, процесс преобразования будет выглядеть следующим образом:

Итерация	РПП до сравнения	РПП после сравнения
1	1000	0000
2	0100	0100
3	0110	0100
4	0101	0101

## АЦП последовательного приближения (4)

После четырех итераций в РПП оказывается двоичное число, из которого после цифро-аналогового преобразования получается напряжение, соответствующее  $U_{вх}$  с точностью до  $1 \text{ ЕМР}$ . 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.

# АЦП последовательного приближения (5)

Быстродействие АЦП данного типа определяется суммой времени установления  $t_{уст}$  ЦАП до установившегося значения с погрешностью, не превышающей 0,5 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  $t_{уст}$  уменьшается с уменьшением веса разряда. Следовательно для определения младших разрядов может быть использована более высокая тактовая частота. При поразрядной вариации  $f_{такт}$  возможно уменьшение времени преобразования  $t_{пр}$  на 40%. Для этого в состав АЦП может быть включен контроллер.

# АЦП последовательного приближения (6)

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 последовательного приближения (7)

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

# Интерфейсы 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.

# Обмен по 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.

# Обмен по прерываниям. Простой вариант

**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.

# Векторное прерывание.

## Обмен с использованием 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.

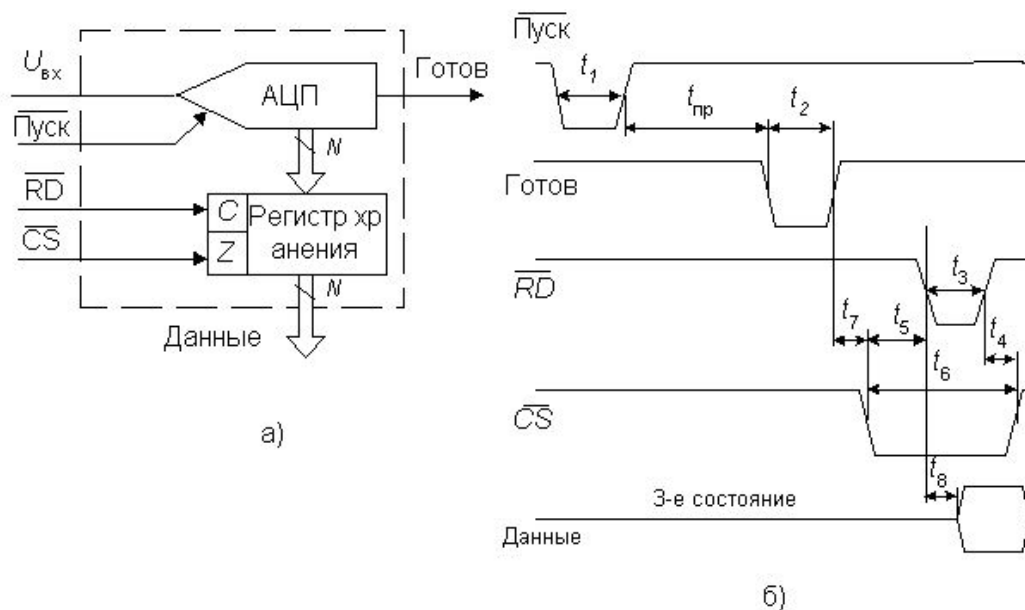
**Прямой доступ к памяти.** Здесь также используется прерывание, но в отличие от предыдущих двух способов, управление по системе прерывания передается на специальный интерфейс, который и производит перезапись данных преобразования в память, минуя регистры процессора. Это позволяет сократить длительность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

# Способы пересылки выходного сигнала

*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, І108ПВ2), так и последовательный (например, AD7893) интерфейсы. Некоторые АЦП последовательного приближения (например, AD7892) имеют интерфейс обоих типов.*

# АЦП с параллельным выходным интерфейсом

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.



АЦП с параллельным интерфейсом и временные диаграммы его работы

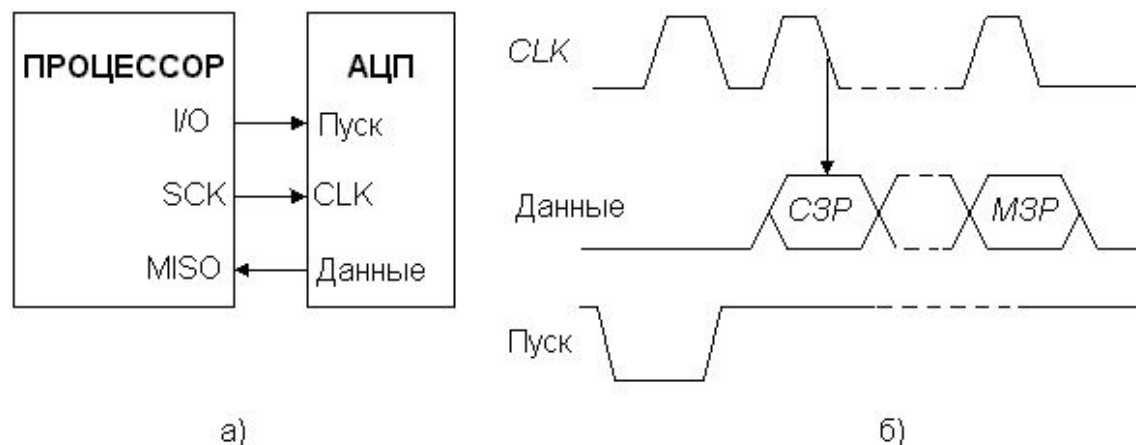
# Работа параллельного выходного интерфейса

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.



# АЦП с последовательным выходным интерфейсом

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).

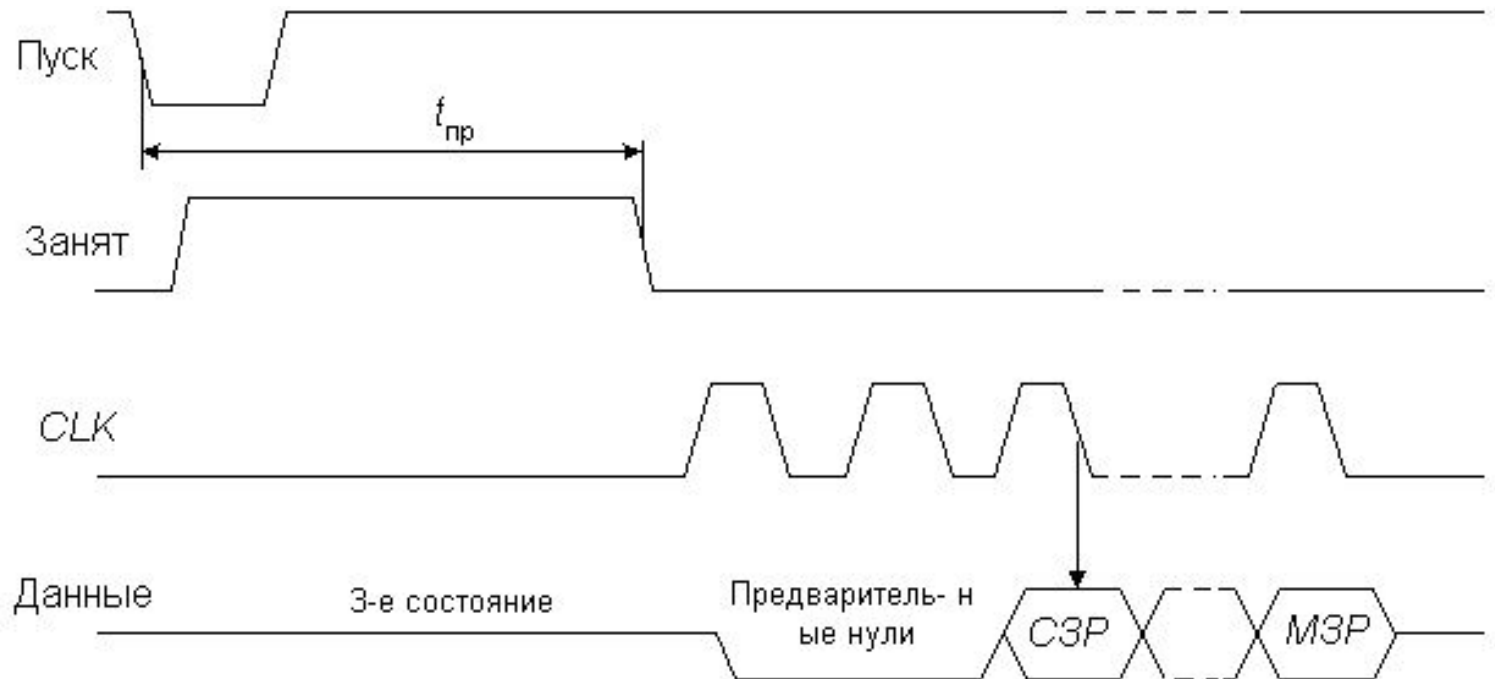


Простейший последовательный интерфейс и временные диаграммы его работы

# Работа последовательного выходного 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.

# Диаграммы работы последовательного выходного интерфейса



Последовательный интерфейс с передачей данных по окончании преобразования

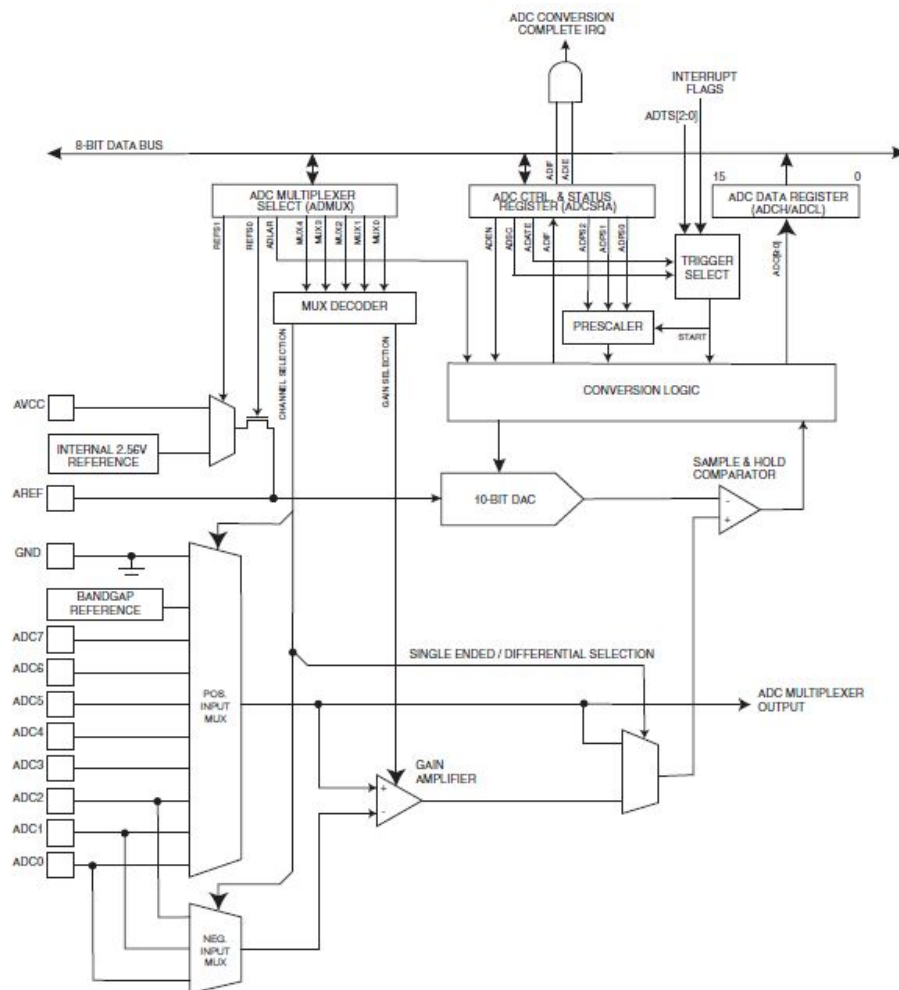
# Работа последовательного

## выходного интерфейса (улучш.)

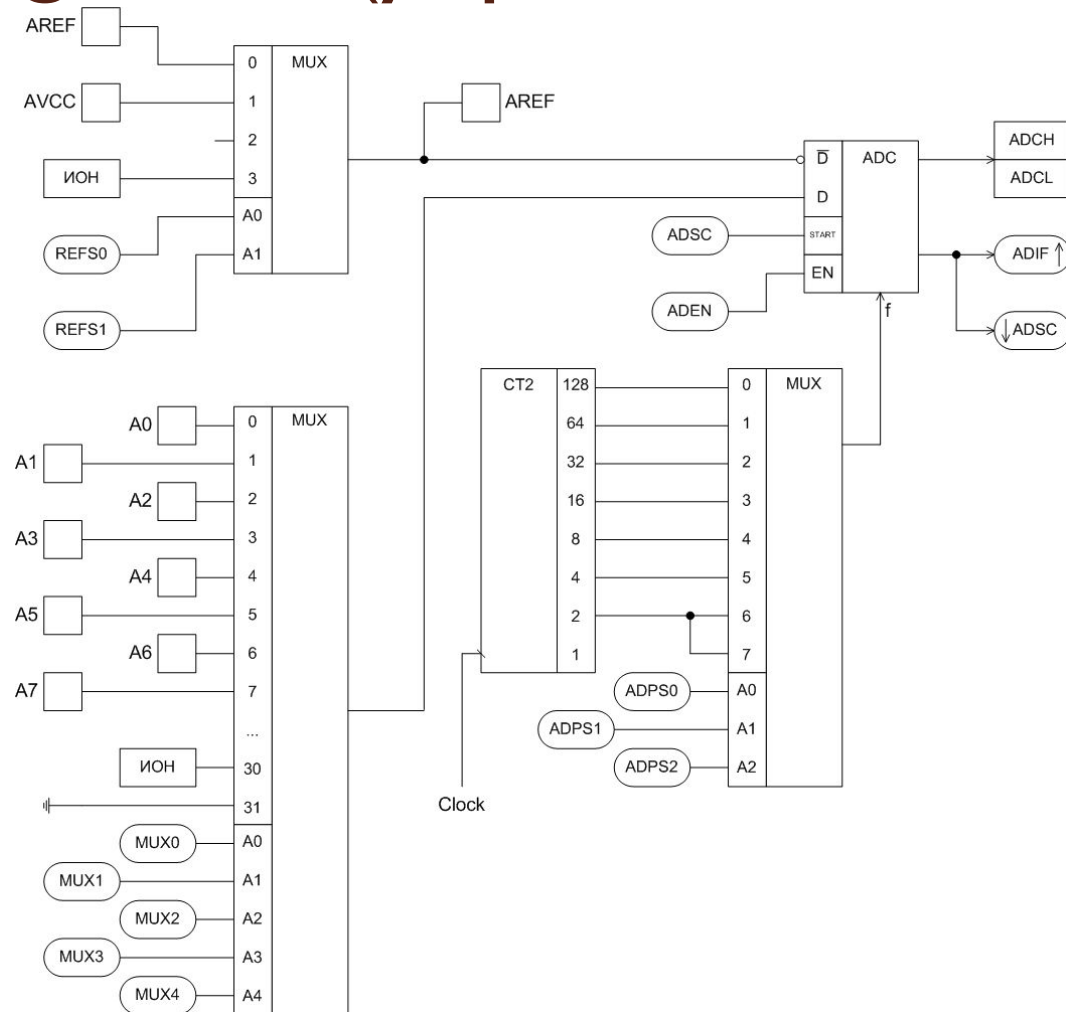
По заднему фронту сигнала "Пуск" УВХ переходит в режим хранения и начинается преобразование. При этом на соответствующем выводе АЦП выставляется сигнал "Занят". По окончании преобразования начинается передача данных. Процессор подает на синхровход АЦП последовательность синхроимпульсов  $CLK$ . Если  $8 < N \leq 16$ , 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.

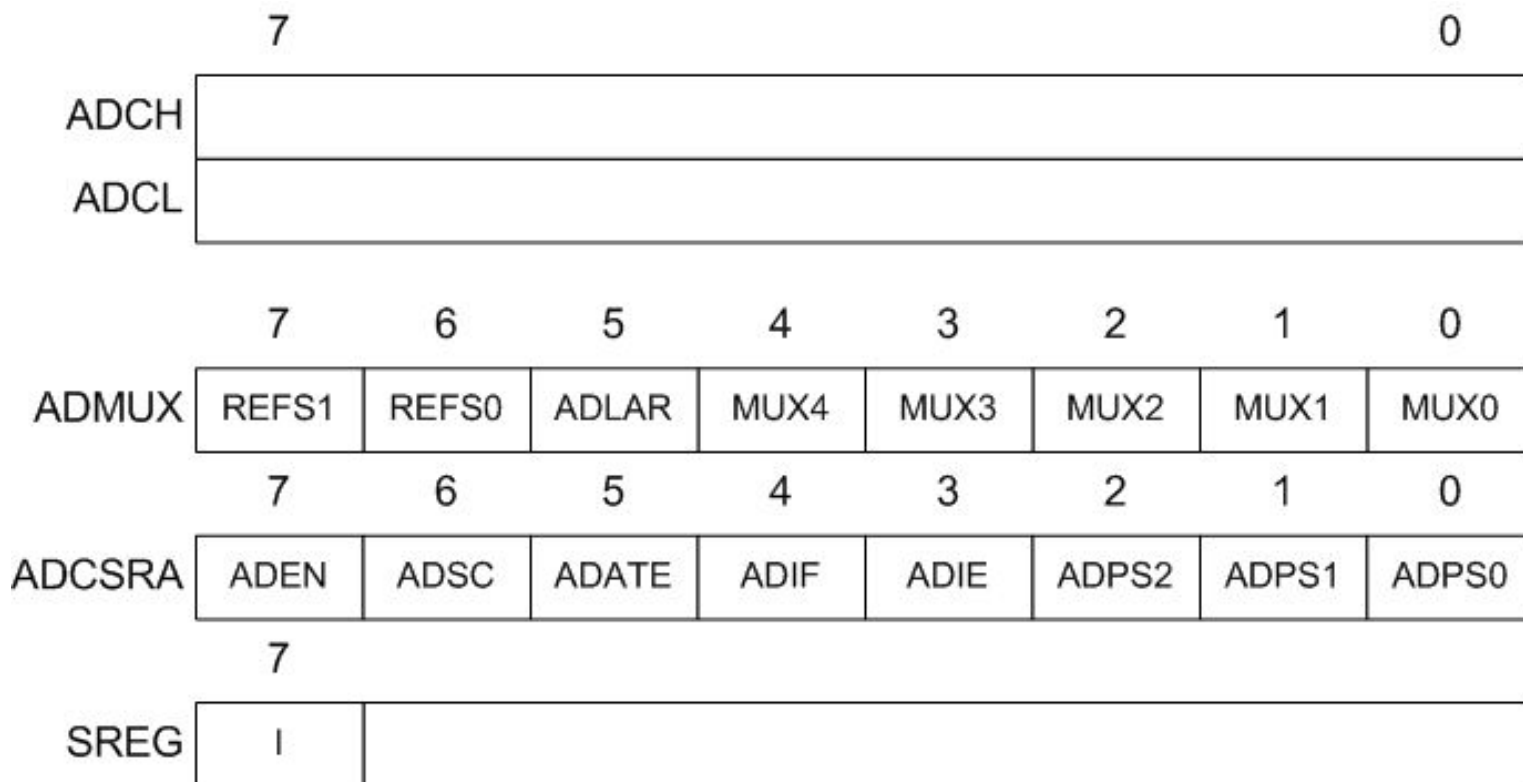
# Схема встроенного АЦП МК АТmega8535



# Встроенный АЦП МК АТмега8535 (упрощенная схема)



# Регистры управления встроенного АЦП МК ATmega8535



# Примеры микросхем АЦП

Название ИМС	Тип АЦП	Разрядность	Интерфейс	Корпус ИМС	$t_{пр}$ , мкс
AD7819	ПП	8	Парал.	DIP	4,5
AD9289	Конвейер.	8	Послед.	CSP	0,015
AD7477	ПП	10	SPI	SO	0,8
AD7994	ПП	12	I2C	SO	2,0
AD6640	Конвейер.	12	Парал.	QFP	0,038
AD7705	<b>ΣΔ</b>	16	SPI	DIP	6000