



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»

**РТУ МИРЭА**

---

## **ЛЕКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

**по дисциплине**

**Цифровые устройства и микропроцессоры**

**Часть 1 (5 семестр)**

**Лекция 11**

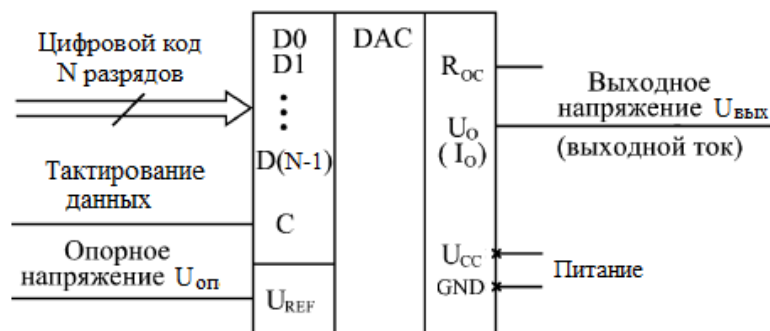
## Основные темы лекции

Цифро-аналоговые преобразователи

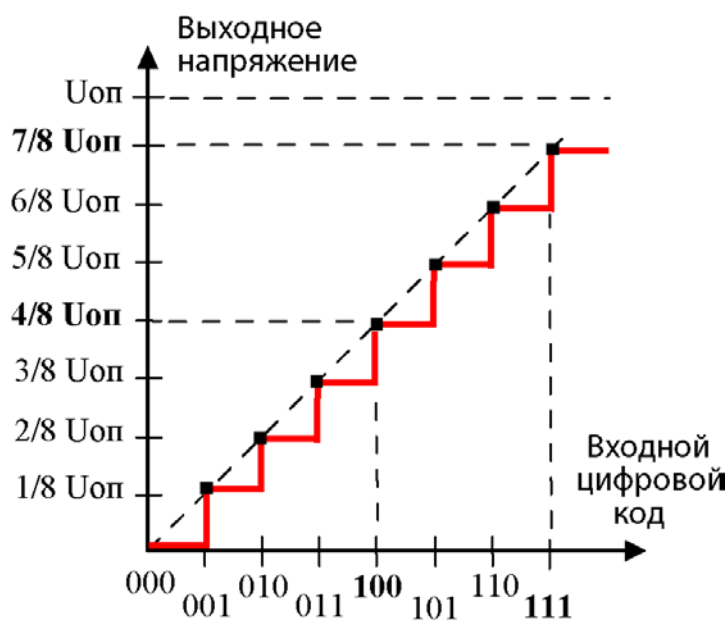
Аналого-цифровые преобразователи

### Цифро-аналоговые преобразователи

ЦАП преобразует значение входного цифрового кода в эквивалентную величину (амплитуду) выходного аналогового сигнала — напряжения или тока. В большинстве случаев выходной сигнал измеряется в единицах напряжения. Минимальный набор сигналов представлен на следующем обозначении микросхемы (сигнал тактирования может отсутствовать):



Передаточная характеристика для смещенного кода и разрядности  $N = 3$ :



$$U_{вых} = U_{оп} \left( \frac{X_{N-1}}{2} + \frac{X_{N-2}}{2^2} + \frac{X_{N-3}}{2^3} + \dots + \frac{X_1}{2^{N-1}} + \frac{X_0}{2^N} \right) = U_{оп} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{X_n}{2^{N-n}}$$

где

$U_{оп}$  — опорное напряжение (в иностранной литературе обычно обозначается  $V_{ref}$ );

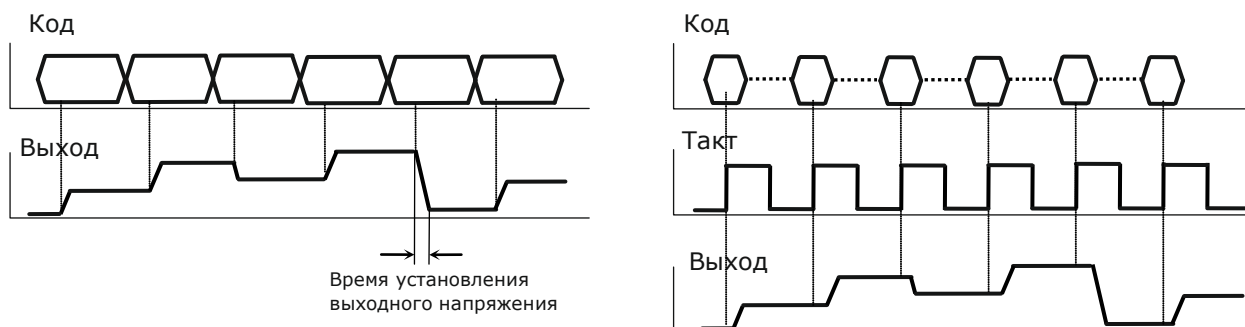
$N$  — разрядность кода;

$X_{N-1} \dots X_0$  — входной двоичный код:  $X_n = \{0, 1\}$ ;

$n$  — номер разряда ( $0 \dots N-1$ ).

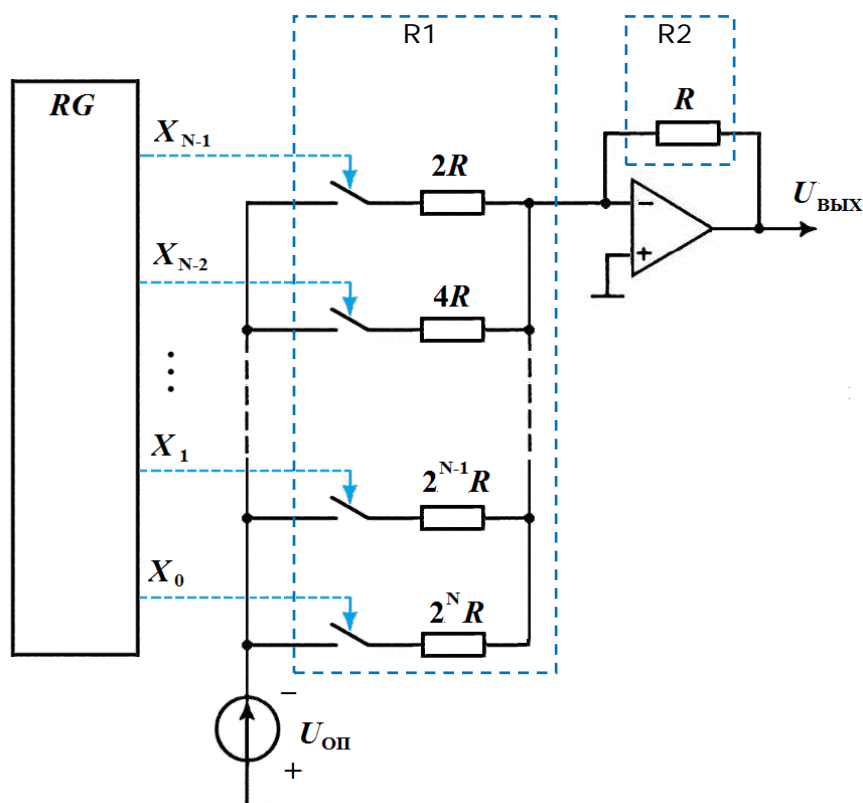
Старший бит имеет вес —  $1/2$  опорного напряжения, следующий более младший —  $1/4$  и т.д. При всех единичных разрядах выходное напряжение почти приближается к опорному. Для приведенной характеристики код и напряжение не имеют знака. Кодирование двухполярных сигналов рассмотрено далее.

### Диаграммы работы ЦАП без тактирования и с тактированием



В ЦАП с тактированием на входе присутствует регистр, запоминающий входной код. Начало изменения выходного уровня относительно момента изменения кода или записи нового всегда происходит с некоторой задержкой. Само нарастание (спад) напряжения имеет конечную скорость.

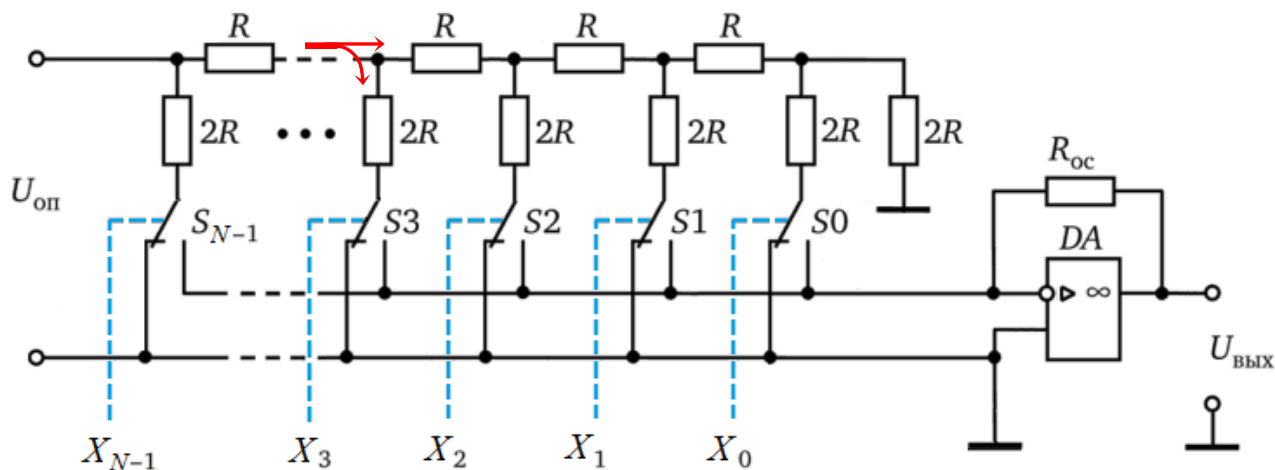
### Схема ЦАП с весовыми резисторами



Формула преобразования приведена выше, с той лишь особенностью, что  $U_{\text{ОП}}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}$  имеют разные знаки. Коэффициент передачи инвертирующего операционного усилителя равен  $-R_2 / R_1$ . При всех нулевых разрядах ключи разомкнуты (как показано на схеме),  $R_1 = \infty$ ,  $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ . При единичном коде резисторы  $2R, 4R, \dots, 2^NR$  включены параллельно, общее сопротивление почти равно  $R$  (чуть-чуть больше), коэффициент усиления близок к  $-1$ , на выходе максимальное напряжение, по величине почти равное опорному.

Недостаток схемы — широкий диапазон сопротивлений резисторов повышенной точности.

### Схема ЦАП с резисторной матрицей R-2R

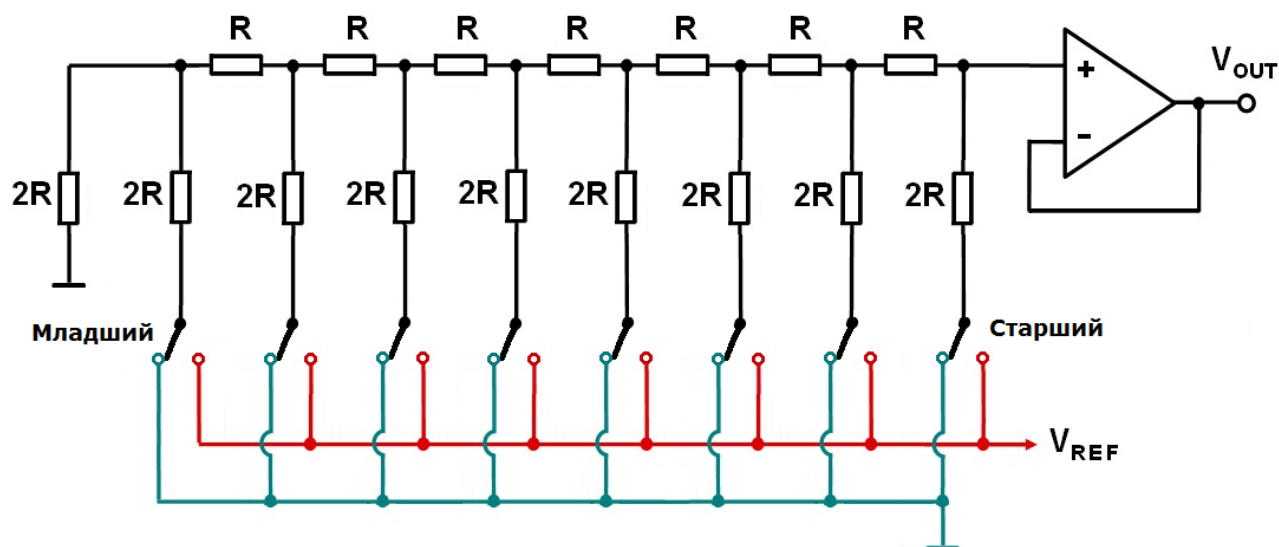


$$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ОП}} \frac{R_{\text{ОС}}}{2R} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{X_n}{2^{N-n}}$$

Схема содержит всего два типа точных резисторов ( $R$ ,  $2R$ ). Переключатели  $S$  управляются разрядами цифрового кода (на схеме их положение соответствует нулевому коду). Независимо от положения переключателей матрица потребляет от источника опорного напряжения всегда один и тот же ток  $U_{\text{оп}}/R$ . В каждом следующем узле, соединяющем резисторы  $R$  и  $2R$ , ток делится пополам (для одного узла на схеме показано красными стрелками), и в зависимости от состояния переключателя ток замыкается на общий провод или поступает на вход операционного усилителя.

Примечание. В реальности с ростом разрядности кода токи через резисторы младших разрядов уменьшаются до такой величины (мкА, нА), что оказываются соизмеримыми с шумами. Кроме того, электронные ключи (МОП или биполярные транзисторы) вносят в цепи свое сопротивление.

### Вариант схемы с матрицей R-2R



Используется так называемая инверсная матрица резисторов. Полярности опорного и выходного напряжений совпадают. От источника опорного напряжения потребляется разный ток, что предъявляет повышенные требования к стабильности источника.

## Биполярные ЦАП

Рассмотренные ранее ЦАП используют беззнаковый цифровой код и выходное напряжение одного знака, такие устройства еще называют *униполярными*. Для реализации биполярного режима можно применять как смещенный, так и дополнительный код. Например, для 8-разрядного ЦАП имеют место следующие соответствия:

Десятичный код	Дополнительный код	Смещенный код	Униполярный выход	Биполярный выход
127	01111111	11111111	$255/256 U_{оп}$	$127/128 U_{оп}$
1	00000001	10000001	$129/256 U_{оп}$	$1/128 U_{оп}$
0	00000000	10000000	$128/256 U_{оп}$	0
-1	11111111	01111111	$127/256 U_{оп}$	$-1/128 U_{оп}$
-127	10000001	00000001	$1/256 U_{оп}$	$-127/128 U_{оп}$
-128	10000000	00000000	0	$-128/128 U_{оп}$

Для перехода от смещенного кода к дополнительному и наоборот достаточно инвертировать старший двоичный разряд.

Для получения выходного напряжения разной полярности необходим сдвиг уровней либо опорного, либо уже полученного выходного напряжений.

Одна из простых схем сдвига для ЦАП с инверсной матрицей приведена ниже (выходное напряжение в диапазоне  $-V_{REF} \dots V_{REF}$ ):

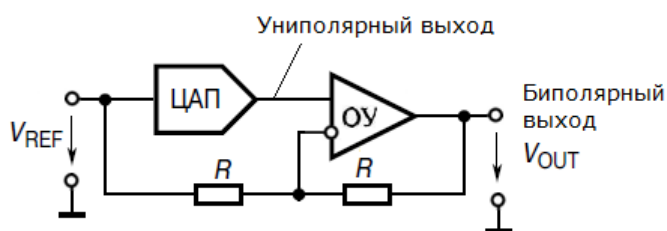
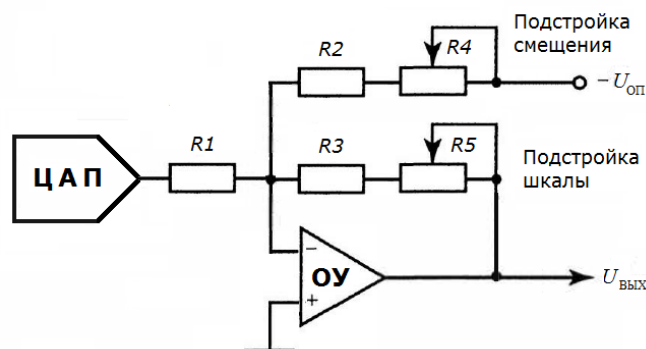
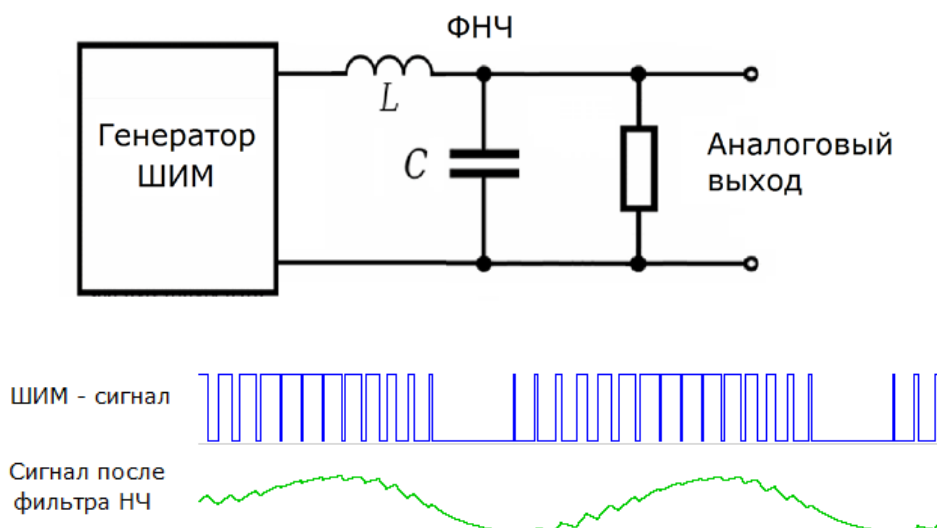


Схема с регулировками



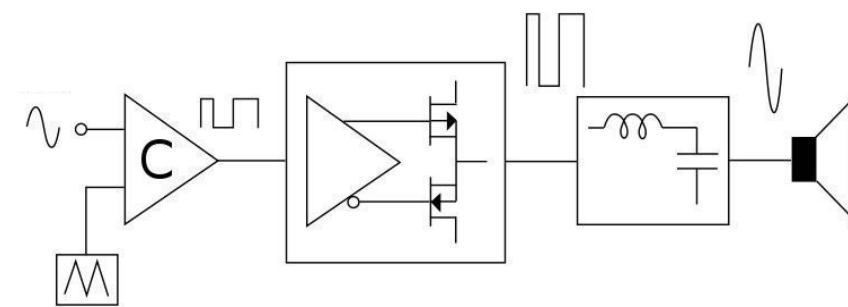
## Последовательный ЦАП с широтно-импульсной модуляцией

В микропроцессорных системах источником ШИМ сигналов являются таймеры. Скважность импульсов легко изменяется программно по любому закону. Для выделения из импульсов постоянной составляющей (среднего значения) необходим фильтр нижних частот. Такие ЦАП обладают очень высоким к.п.д.

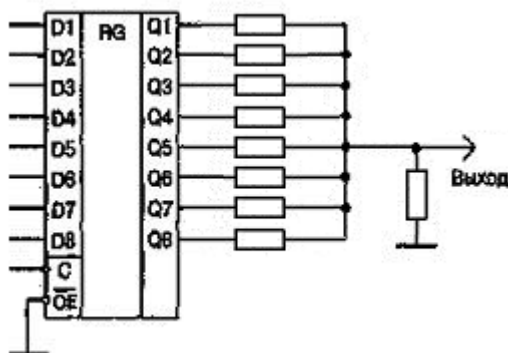


Задание на **самостоятельную** работу: составить схему генерации ШИМ-сигнала на типовых цифровых компонентах, изучаемых в нашем курсе, использовать модулирующий сигнал произвольной формы.

Принцип получения аналогового сигнала из ШИМ-сигнала реализован в аудио-усилителях класса D, используемых во всех современных мобильных устройствах.



### Простейший ЦАП на резисторах

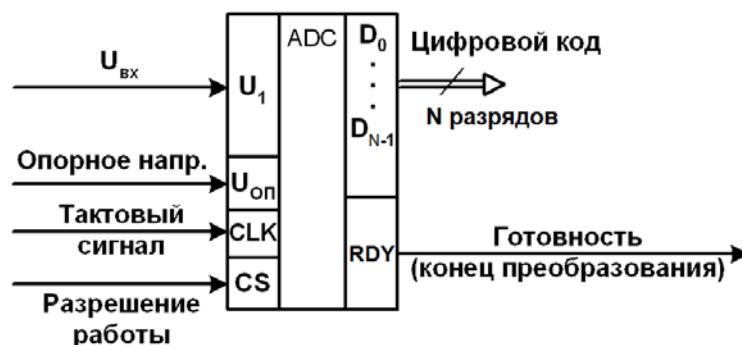


Пригоден для очень грубого преобразования. Предлагается **самостоятельно** сформулировать его недостатки.

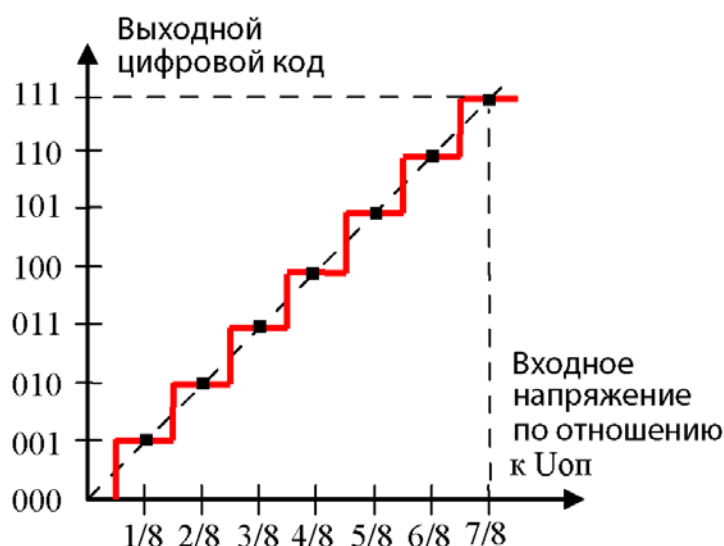
Задание на **самостоятельную** работу: сравнить рассмотренные типы ЦАП по основным параметрам: разрядности, точности, скорости. Результаты рекомендуется представить в виде таблицы.

## Аналого-цифровые преобразователи

АЦП формируют на выходе двоичный код, соответствующий амплитуде входного аналогового сигнала. В большинстве случаев входным параметром является напряжение. Типичная микросхема АЦП с минимальным набором управляющих сигналов приведена ниже.



Передаточные характеристики, формулы преобразования в принципе аналогичны характеристикам и формулам для ЦАП (с взаимной заменой определений: входной, выходной). Ниже приведена несколько скорректированная передаточная характеристика, в которой отражен метод квантования с округлением до ближайшего дискретного уровня.

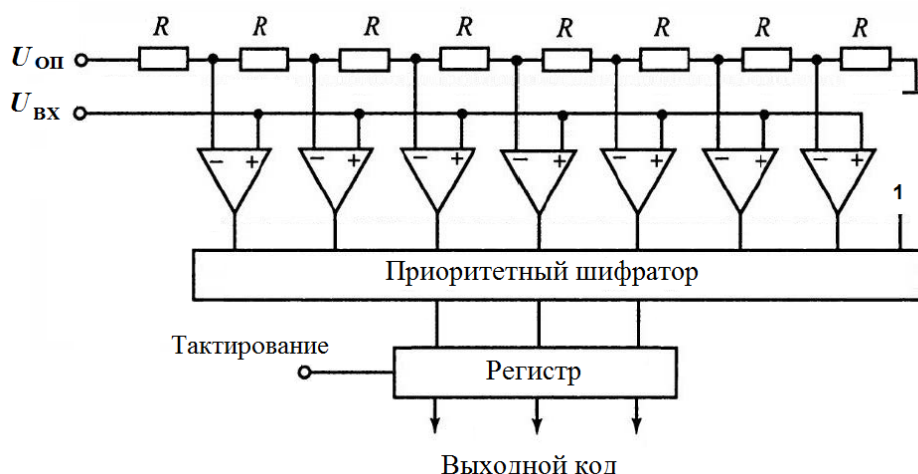


### Параллельные АЦП

Другие названия: прямого преобразования, "АЦП по способу считывания".

При  $N$ -разрядном двоичном коде содержат  $2^{N-1}$  компараторов (по одному компаратору на каждый дискретный уровень входного сигнала). На компараторы подаются опорные напряжения, различающиеся на шаг квантования. При росте входного напряжения последовательно срабатывают (выдают лог. 1) компараторы в направлении от младшего к старшему, код принимает значения 00000001, 00000011, 00000111, .... Приоритетный шифратор преобразует такой код в обычный двоичный. Данные в выходном регистре обновляются по тактовым импульсам.

В приведенном варианте с одинаковыми резисторами квантование осуществляется с усечением (выбирается уровень, меньший входного напряжения). Для реализации округления к ближайшему уровню номинал крайних резисторов в цепочке вместо  $R$  необходимо взять равным  $R/2$ .

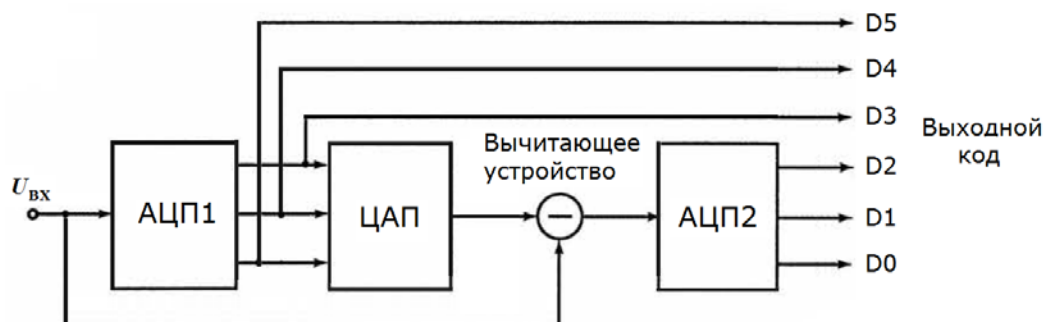


Данный тип АЦП на сегодняшний день является самым быстрым. Однако с ростом разрядности усложняется схема и растет входная емкость, поэтому максимальную разрядность ограничивают числом 8-10.

### Параллельно-последовательные

Другие названия: последовательно-параллельные, параллельные многоступенчатые. Содержат 2 или более параллельных АЦП меньшей разрядности. Сначала производится грубое преобразование первым АЦП, результат этого преобразования подается на выход в качестве старших разрядов и одновременно на ЦАП. Выходное аналоговое напряжение с ЦАП сравнивается со входным, разность напряжений поступает на следующий АЦП, который формирует младшие разряды. Таким образом, следующие каскады оцифровывают ошибки предыдущих.

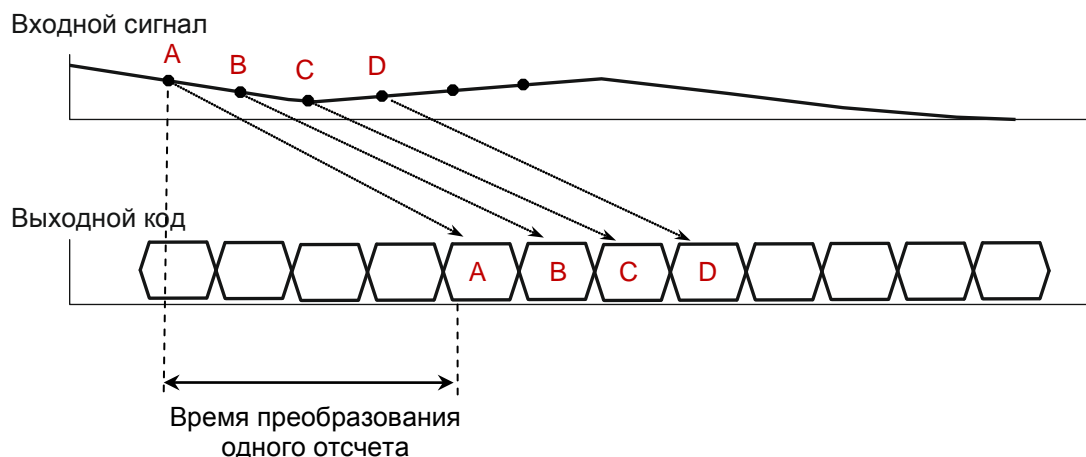
Так как при оцифровке одного отсчета каскады не работают одновременно, то в таких устройствах можно реализовать конвейерный принцип работы. Чтобы выходной код был действительным только после формирования самых младших разрядов, на старшие необходимо установить элементы задержки (регистры). Предлагается **самостоятельно** составить схему такого конвейерного АЦП.



Некоторое снижение быстродействия последовательно-параллельных АЦП в сравнении с чисто параллельными компенсируется значительным уменьшением количества компараторов.



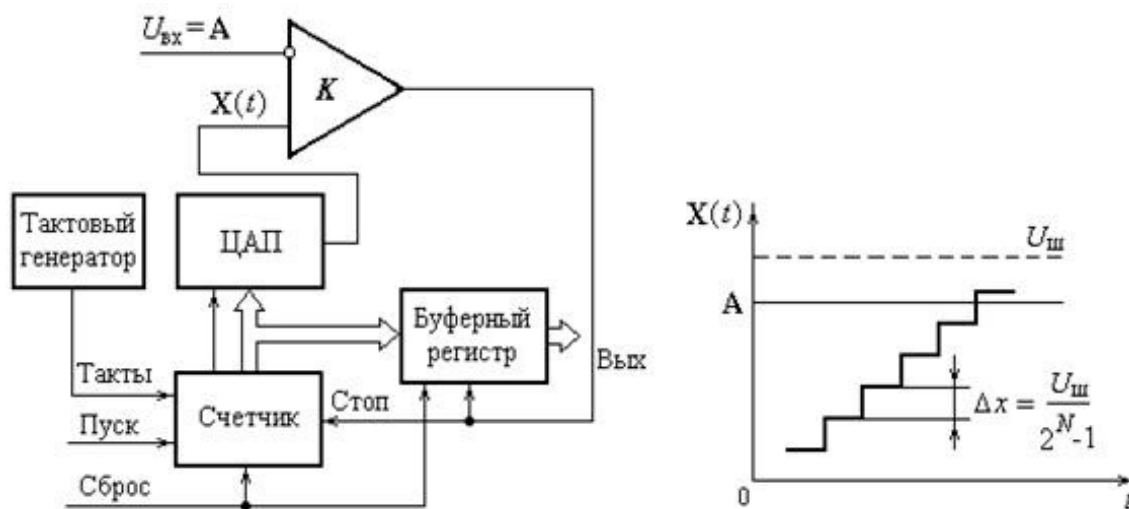
### Диаграмма работы конвейерного АЦП



### АЦП последовательного счета

Другие названия: интегрирующие, с время-импульсным преобразованием, дифференциального кодирования, с пилообразным сигналом.

В одном из вариантов входное напряжение сравнивается с пилообразным опорным напряжением, формируемым посредством генератора импульсов, счетчика и ЦАП. Подсчитанное число импульсов пропорционально уровню входного напряжения.

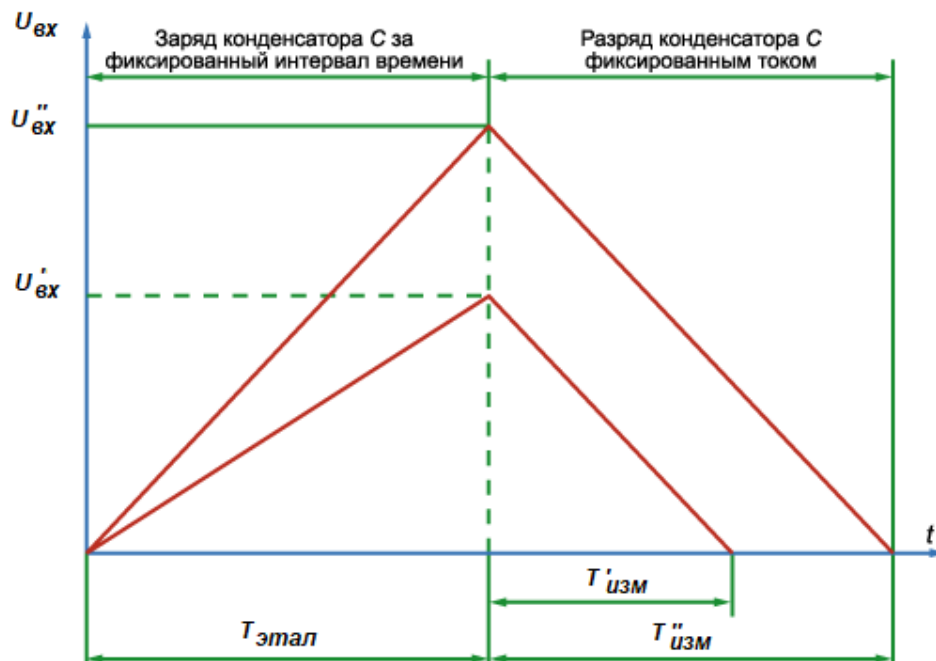
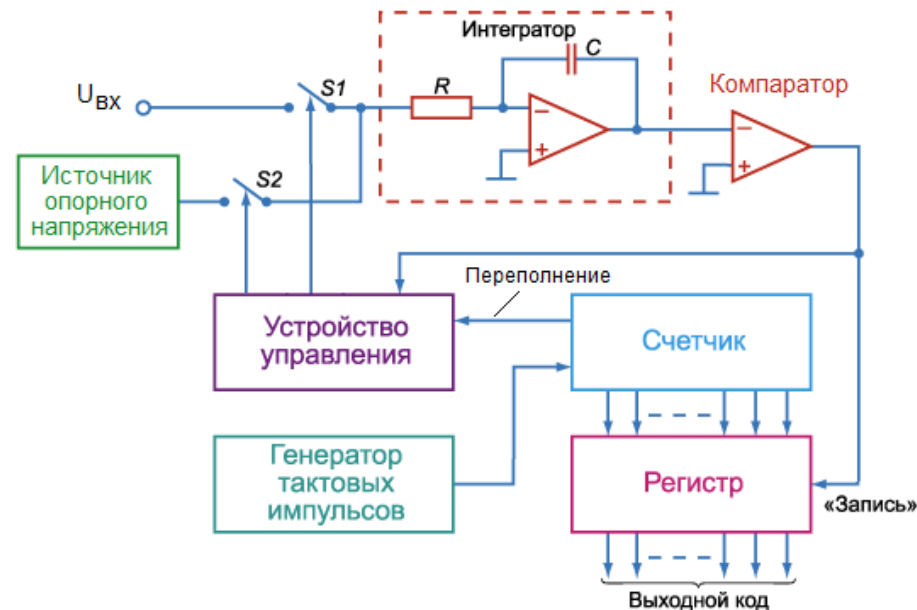


В лабораторной работе 3 использован АЦП последовательного счета с иным алгоритмом: конденсатор, заряженный до уровня входного напряжения, линейно разряжается, и в это время ведется подсчет импульсов тактового генератора. Предлагается **самостоятельно** привести структурную схему.

АЦП имеют невысокое быстродействие и невысокую точность.

## АЦП с двойным интегрированием

Другие встречающиеся названия: двойные, с уравниванием заряда, с двухтактным / двухэтапным интегрированием, многотактным интегрированием.



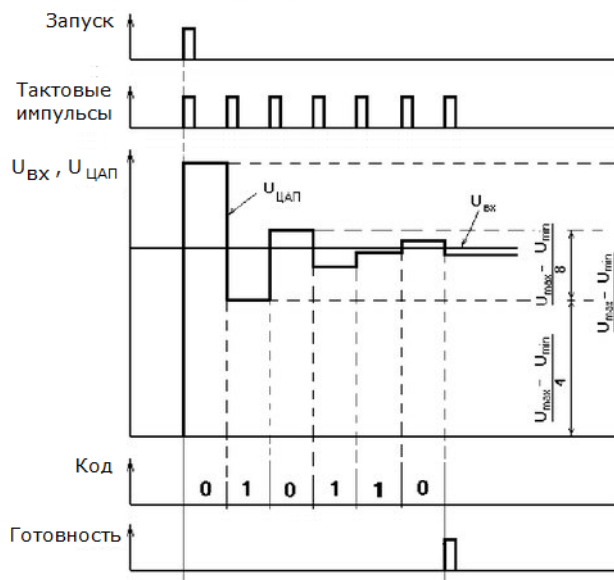
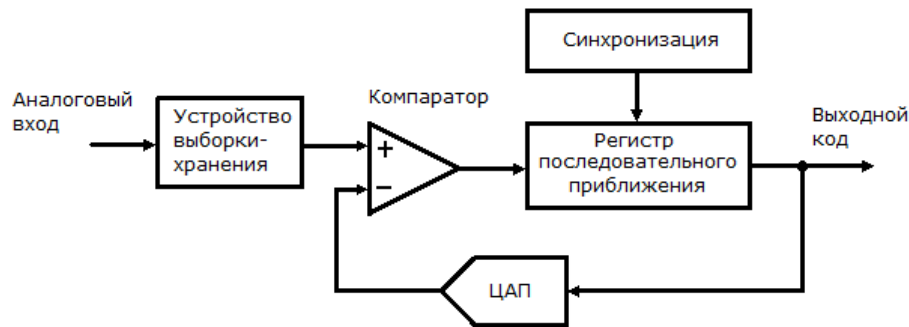
Являются развитием АЦП последовательного счета. При замыкании  $S1$  начинается интегрирование входного напряжения в течение заданного временного интервала ( $T_{\text{этал}}$ ) – выходное напряжение линейно нарастает до некоторой величины ( $U'_{\text{vx}}$ ,  $U''_{\text{vx}}$ ), зависящей от реального входного напряжения. Эталонное время формируется счетчиком (до его переполнения). После  $S1$  размыкается, а замыкается  $S2$ , подавая на вход интегратора опорное напряжение противоположного знака. Конденсатор разряжается постоянным током, выходное напряжение интегратора линейно уменьшается, пока не достигнет нуля и не сработает компаратор. Время разряда подсчитывается счетчиком и по окончании счета записывается в регистр.

Компенсируются ошибки из-за некоторых нестабильных параметров (емкости конденсатора, частоты генератора, сетевых помех, температуры). Самые медленные, но и самые точные АЦП, используются в измерительных приборах.

## АЦП последовательного приближения

Другие названия: поразрядного кодирования, с поразрядным уравниванием.

Работают по принципу последовательного приближения к значению сигнала. В специальном регистре (регистре последовательного приближения) производится поочередная пробная установка разрядов, начиная со старшего, если получаемому коду соответствует напряжение, превышающее входное, разряд возвращается в 0. На входе обязательно должно присутствовать устройство выборки-хранения. Преобразование N-разрядного кода занимает N-тактов. Максимальная разрядность – до 16, частота – до 1 МГц.



Задание на **самостоятельную** работу: составить схему регистра последовательного приближения.

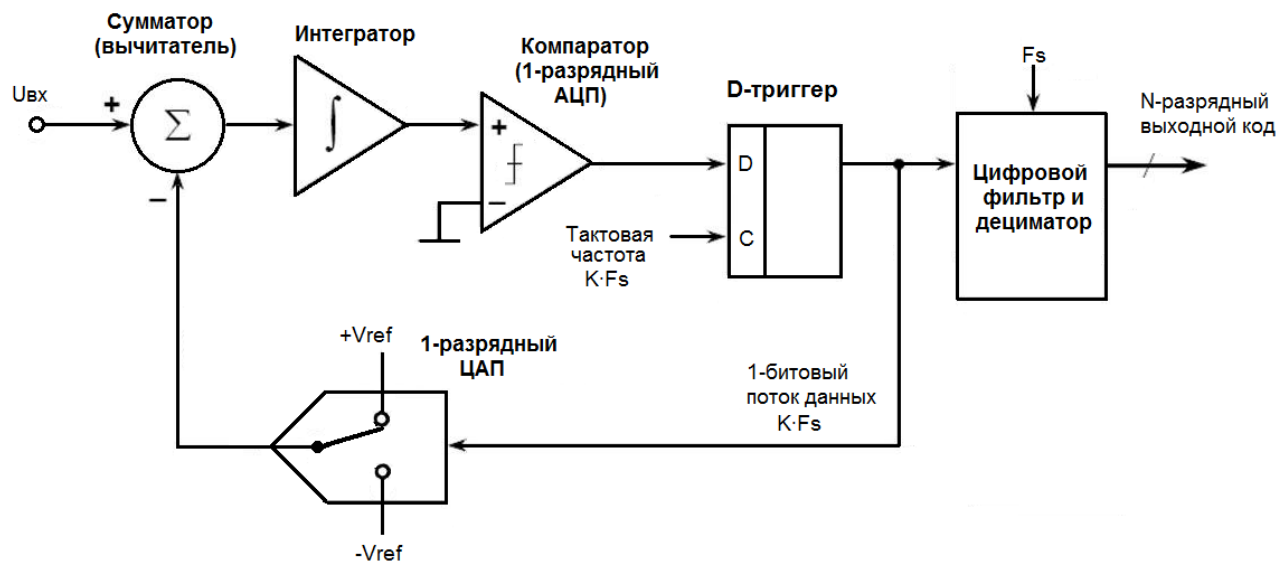
## Сигма-дельта АЦП

Другие названия: дельта-сигма, с балансировкой / уравниванием заряда. В устройстве присутствуют сумматор ( $\Sigma$ ), интегратор ( $\Delta$ ).

Принцип работы: генерируется битовый поток, в котором соотношение единиц и нулей на некотором временном интервале соответствует среднему значению входного напряжения. В устройстве сравниваются (вычитаются) входное напряжение и импульсный сигнал из цепи обратной связи, разность интегрируется, ее знак корректирует соотношение единиц и нулей сигнала обратной связи. Из этой же битовой последовательности цифровой фильтр, в качестве которого может использоваться счетчик, формирует цифровой код. Частота дискретизации (частота следования бит потока) выбирается в десятки раз выше, чем требуется по теореме Котельникова (такую частоту называют частотой передискретизации), это требуется, чтобы усреднение проводилось по возможности на большем интервале времени.

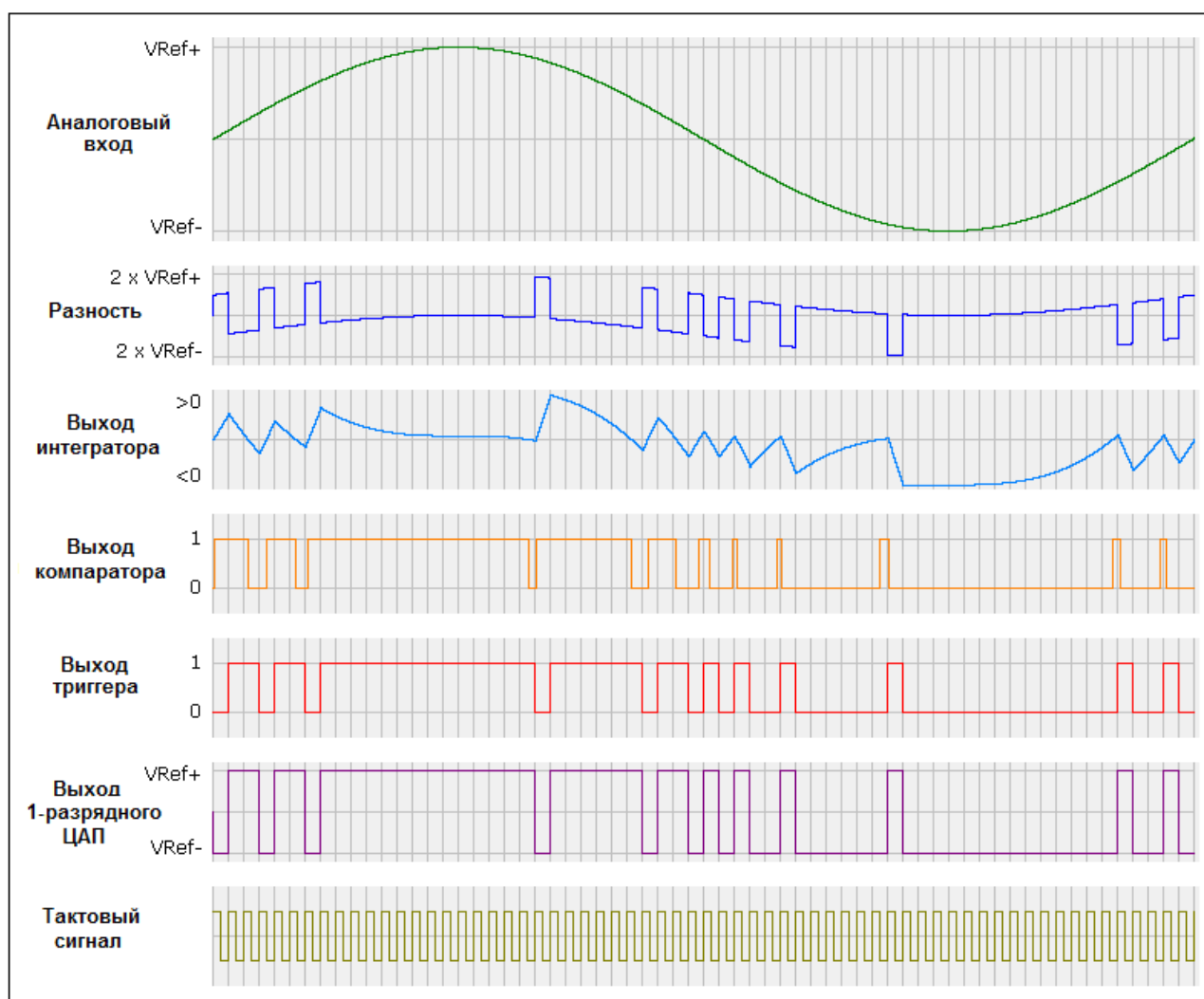
АЦП обладает очень хорошей линейностью, малым уровнем шумов. разрядность достигает 24 и более.

### Функциональная схема сигма-дельта АЦП первого порядка



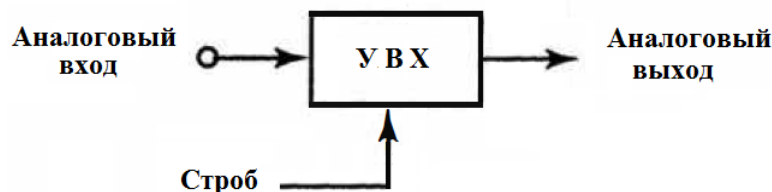
### Диаграммы работы сигма-дельта АЦП

[<https://beis.de/Elektronik/DeltaSigma/DeltaSigma.html>]



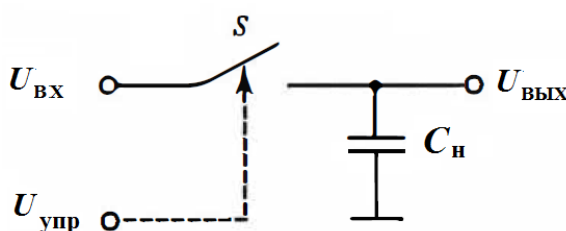
## Устройство выборки-хранения (УВХ)

Используется для фиксации и сохранения уровня входного напряжения в течение времени преобразования. Устройство "захватывает" входной сигнал в момент подачи управляющего сигнала — строба.

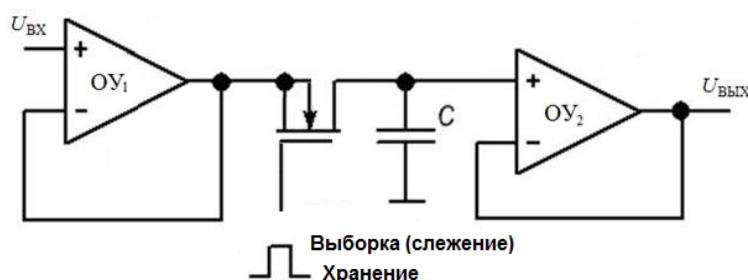


Упрощенно принцип действия УВХ можно представить накопительным конденсатором  $C_H$ , заряжаемым от входного напряжения при замыкании ключа  $S$ . Ключ может замыкаться:

- на короткое время — режим выборки и хранения;
- быть все время замкнутым, а размыкаться на период преобразования — режим слежения и хранения.



Важно обеспечить малое выходное сопротивление источника  $U_{ВХ}$  и большое — последующих каскадов. Пример простой схемы УВХ:



Задание на **самостоятельную** работу: сравнить рассмотренные типы АЦП по основным параметрам: разрядности, точности, скорости. Результаты рекомендуется представить в виде таблицы.