



Цифровые устройства

IV. Аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) предназначен для преобразования числа, заданного в виде двоичного кода, в напряжение или ток, пропорциональные значению цифрового кода.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) предназначены для преобразования аналоговых (непрерывных) сигналов в цифровую форму.

При построении ЦАП и АЦП применяются аналоговые ключи, коммутирующие цепи аналоговых сигналов под воздействием управляющих цифровых сигналов. Токи, коммутируемые электронными аналоговыми ключами, не превышают 10...50 мА. Относительно высокое сопротивление открытого ключа (50 - 600 Ом) требует наличия высокоомной нагрузки, что обеспечивается высокоомным входным сопротивлением операционного усилителя.



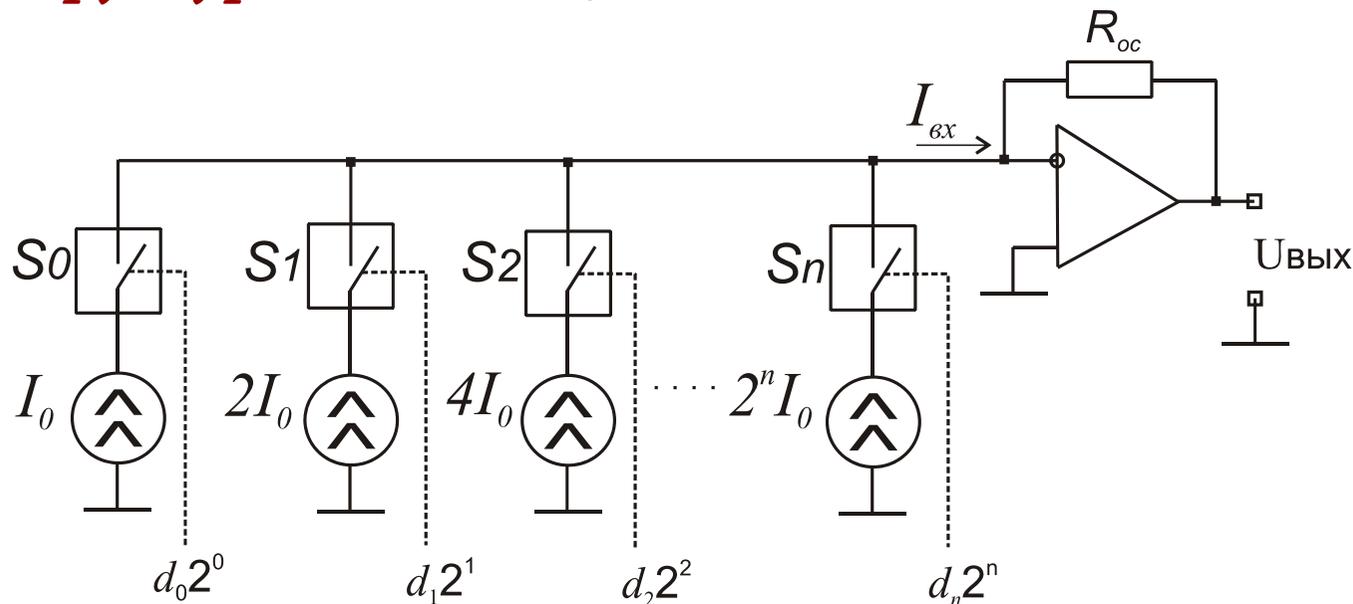
1. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)

ИМС цифро-аналоговых преобразователей *классифицируются* по следующим признакам:

- *По виду выходного сигнала:* с **ТОВОМ** выходом и выходом в виде **напряжения**.
- *По типу цифрового интерфейса:* с **последовательным** вводом и с **параллельным** вводом входного кода.
- *По числу ЦАП на кристалле:* **одноканальные** и **многоканальные**.
- *По быстродействию:* **умеренного** и **высокого** быстродействия.

Принцип преобразования заключается в суммировании всех разрядных токов (или напряжений), взвешенных по двоичному закону и пропорциональных значению опорного напряжения. Другими словами, преобразование заключается в суммировании токов или напряжений, пропорциональных весам двоичных разрядов, причем суммируются только токи тех разрядов, значения которых равны лог. 1. В двоичном коде вес от разряда к разряду изменяется вдвое.

Структурная схема ЦАП



$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{OC}}$$

$$I_{\text{ВХ}} = d_0 \cdot I_0 + d_1 \cdot 2 \cdot I_0 + d_2 \cdot 4 \cdot I_0 + \dots + d_n \cdot 2^n \cdot I_0$$

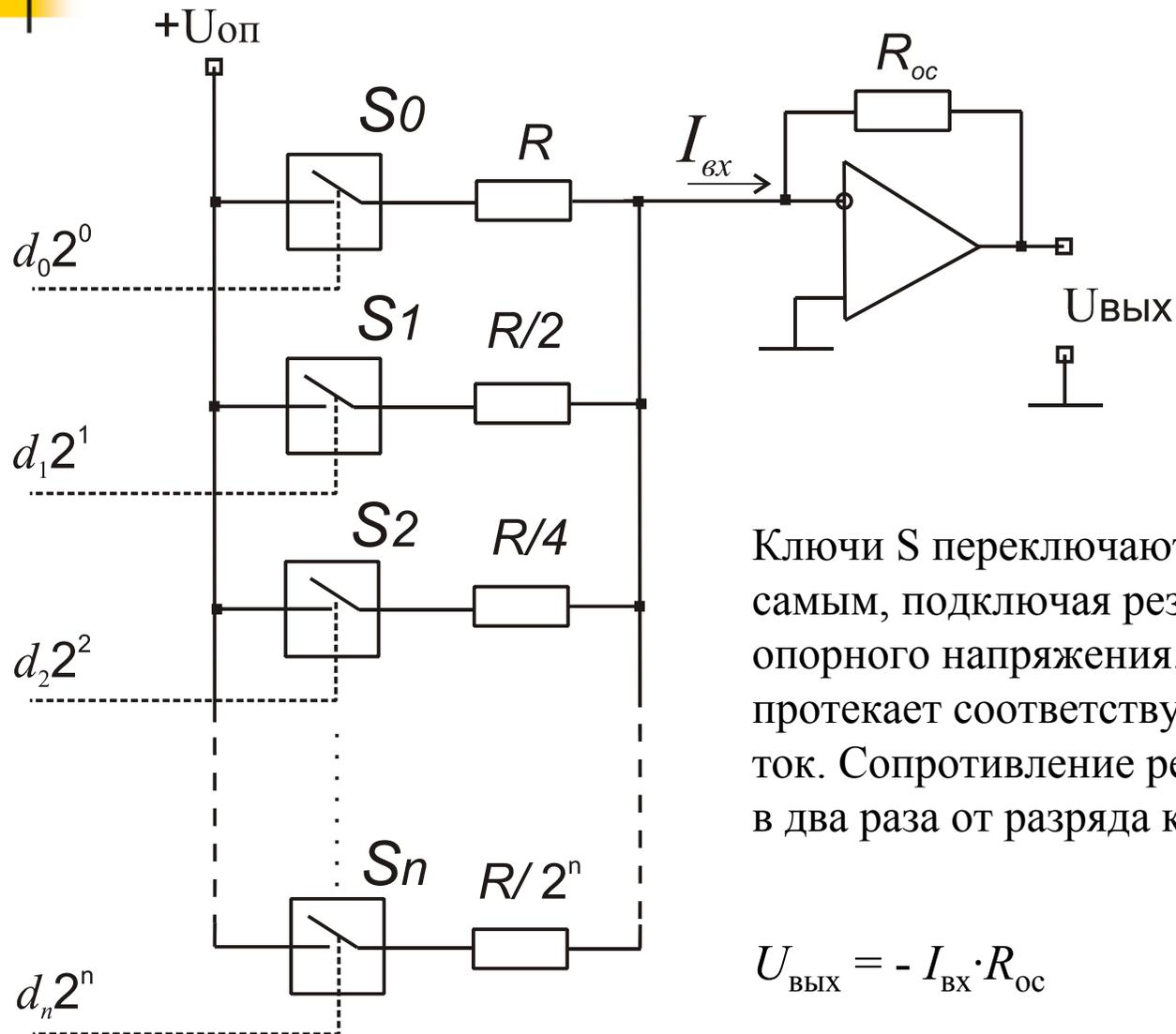
$d_0, d_1, d_2 \dots d_n$ – значение n -го разряда (“0” или “1”).

Если входной ток увеличивать в 2 раза, то $U_{\text{ВЫХ}}$ увеличивается в 2 раза.

Минимальное изменение $U_{\text{ВЫХ}}$ при изменении управляющего кода $d_0, d_1, d_2 \dots d_n$ на единицу младшего разряда, называется *шагом квантования*.



Параллельная схема суммирования токов



Ключи S переключаются при $d_n = 1$, тем самым, подключая резисторы к источнику опорного напряжения. Через резисторы протекает соответствующий весу разряда ток. Сопротивление резисторов уменьшается в два раза от разряда к разряду.

$$U_{\text{ВЫХ}} = - I_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{ос}}$$

$$I_{\text{ВХ}} = U_{\text{оп}} (d_0/R + d_1 \cdot 2/R + d_2 \cdot 4/R + \dots + d_n \cdot 2^n/R)$$



Особенности параллельной схемы суммирования токов

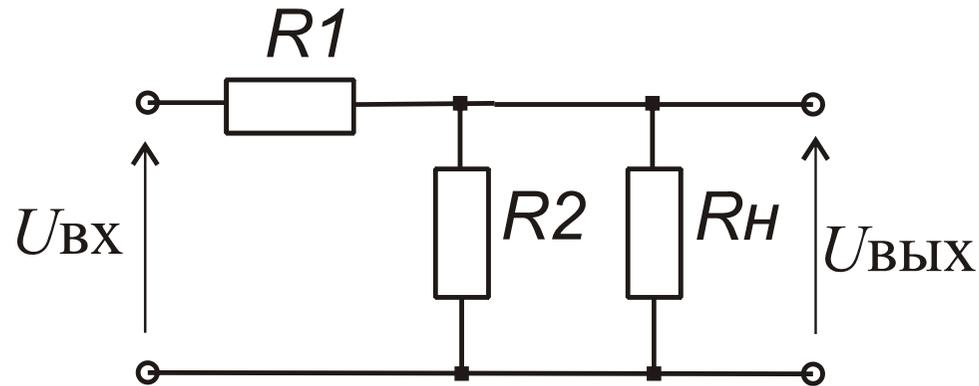
- При высокой разрядности сопротивления резисторов должны быть согласованы с высокой точностью.
- Особо жесткие требования предъявляются к резисторам старших разрядов, поскольку разброс тока в них не должен превышать тока младшего разряда. Разброс сопротивления в n -м разряде должен быть меньше, чем:
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2^n}$$
- При различных входных кодовых состояниях потребляемый от источника опорного напряжения (ИОН) ток будет также различным, что, несомненно, повлияет на величину выходного напряжения ИОН.
- Сопротивления весовых резисторов могут отличаться в тысячи раз, что затрудняет реализацию таких резисторов в полупроводниковых ИС. Помимо этого, сопротивления резисторов старших разрядов могут быть соизмеримы с сопротивлением замкнутого ключа, а это приведет к погрешностям преобразования.

Такая схема ЦАП применяется при небольшом числе разрядов ($n < 8$).



Последовательная схема суммирования токов

В ЦАП, выполненных по интегральной технологии, в основном применяются резистивные матрицы **R-2R**. Ее также называют матрицей **постоянного сопротивления**.



$$R_1 = R$$

$$R_2 = R_n = 2R$$

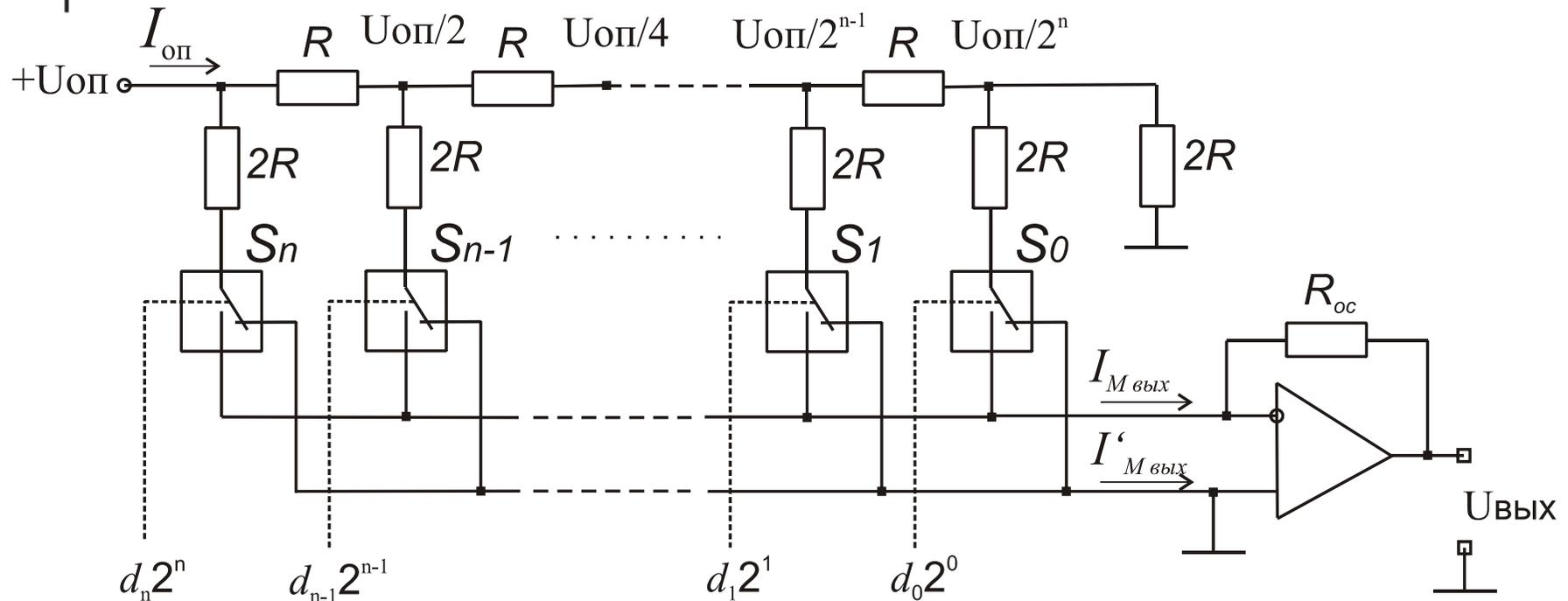
$$R_{\text{ВХ}} = 2R = R_n$$

Условие:

если делитель нагружен на сопротивление нагрузки, то его входное сопротивление также должно быть равно сопротивлению нагрузки.



Последовательная схема суммирования токов



$I_{M \text{ вых}}$ – выходной ток резистивной матрицы, также входной ток ОУ.

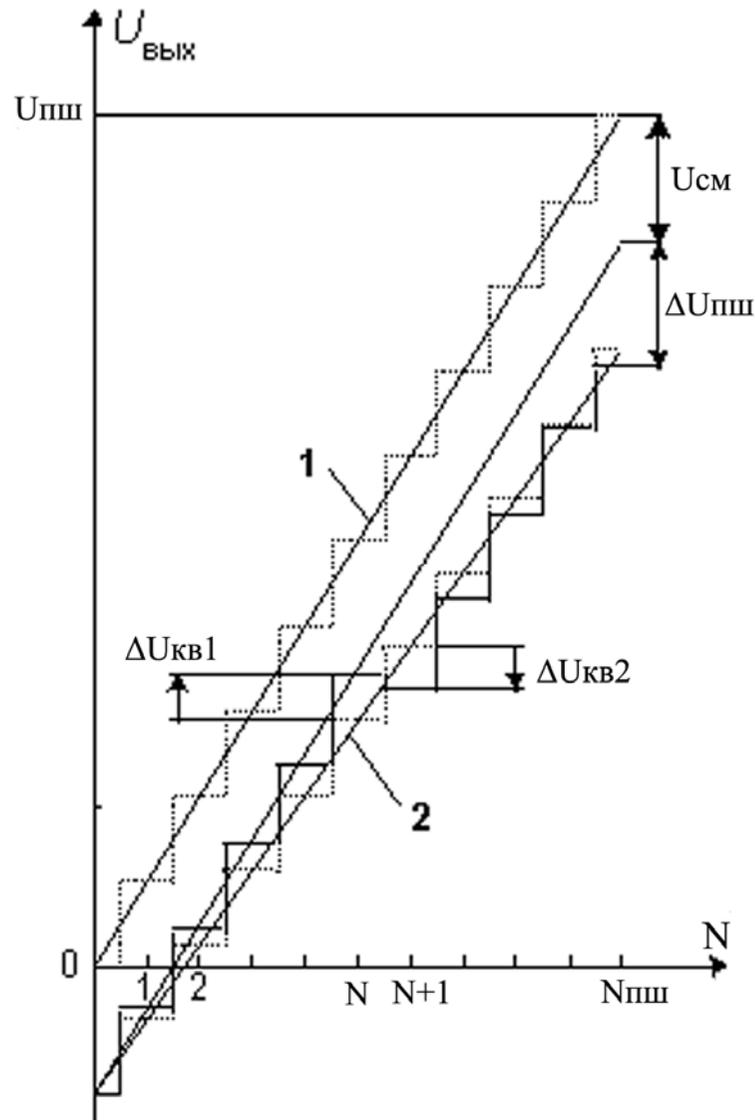
Для такой схемы: $U_{\text{вых}} = -I_{M \text{ вых}} \cdot R_{\text{ос}}$

$$I_{M \text{ вых}} = \frac{U_{\text{оп}}}{2R} \left(\frac{d^n}{2^0} + \frac{d^{n-1}}{2^1} + \frac{d^{n-2}}{2^2} + \dots + \frac{d^1}{2^{n-1}} + \frac{d^0}{2^n} \right)$$

$$U_{\text{вых}} = -\frac{U_{\text{оп}} R_{\text{ос}}}{2R} \left(\frac{d^n}{2^0} + \frac{d^{n-1}}{2^1} + \frac{d^{n-2}}{2^2} + \dots + \frac{d^1}{2^{n-1}} + \frac{d^0}{2^n} \right)$$

Характеристики ЦАП

Характеристика преобразования – зависимость $U_{\text{ВЫХ}}$ от входного кода N (часто входной код обозначают также буквой D).



При последовательном возрастании значений входного цифрового сигнала N от 0 до $2^n - 1$ через единицу младшего разряда (ЕМЗР) выходной сигнал $U_{\text{ВЫХ}}(N)$ образует ступенчатую кривую. В отсутствие аппаратных погрешностей средние точки ступенек расположены на идеальной прямой, которой соответствует идеальная характеристика преобразования.

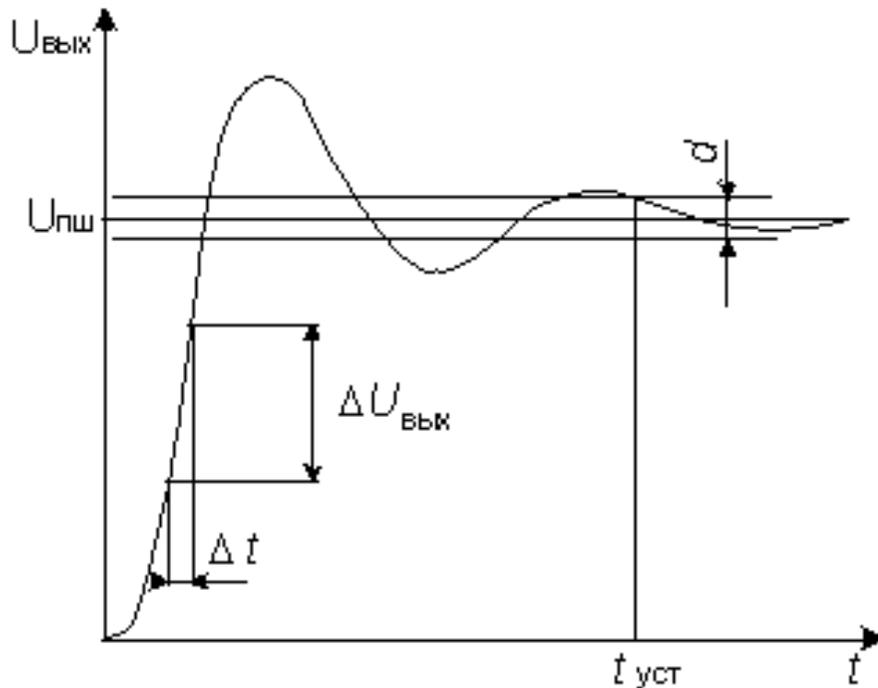
Реальная характеристика преобразования может существенно отличаться от идеальной размерами и формой ступенек, а также расположением на плоскости координат.



Статические параметры

- Разрядность
- Разрешающая способность (относительная, абсолютная)
- Напряжение питания
- Уровни управляющего напряжения
- Величина опорного напряжения
- Максимальный выходной ток
- Погрешность преобразования:
 - погрешность полной шкалы (абсолютная погрешность преобразования);
 - погрешность смещения нуля;
 - погрешность линейности (нелинейность преобразования);
 - дифференциальная погрешность (дифференциальная нелинейность преобразования).

Динамические параметры



Переходная характеристика ЦАП

8. Скорость нарастания — максимальная скорость изменения $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ во время переходного процесса. Определяется как отношение приращения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ ко времени Δt , за которое произошло это приращение.

9. Время преобразования $t_{\text{преоб}}$ (время установления выходного кода $t_{\text{уст}}$) — интервал времени от подачи входного двоичного кода до появления аналогового выходного сигнала, соответствующего этому коду. Т.е до момента, когда в последний раз выполняется равенство $|U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ПШ}}| = d/2$.



Параметры ЦАП

Разрешающая способность - приращение $U_{\text{вых}}$ при преобразовании смежных значений N_j , т.е. отличающихся на ЕМЗР. Это приращение является шагом квантования. Для двоичных кодов преобразования номинальное значение шага квантования $U_{\text{кв}} = U_{\text{пш}} / (2^n - 1)$, где $U_{\text{пш}}$ - номинальное максимальное выходное напряжение ЦАП (напряжение полной шкалы), n - количество разрядов двоичного числа, подаваемого на вход ЦАП (n - соответствует числу разрядных входов ЦАП).

$$d_a = U_{\text{кв}} = U_{\text{пш}} / (2^n - 1)$$

Чем больше разрядность преобразователя, тем выше его разрешающая способность.

Относительная разрешающая способность - это обратная величина от максимального числа уровней квантования ($2^n - 1$):

$$d_{\text{отн}} = 1 / (2^n - 1).$$

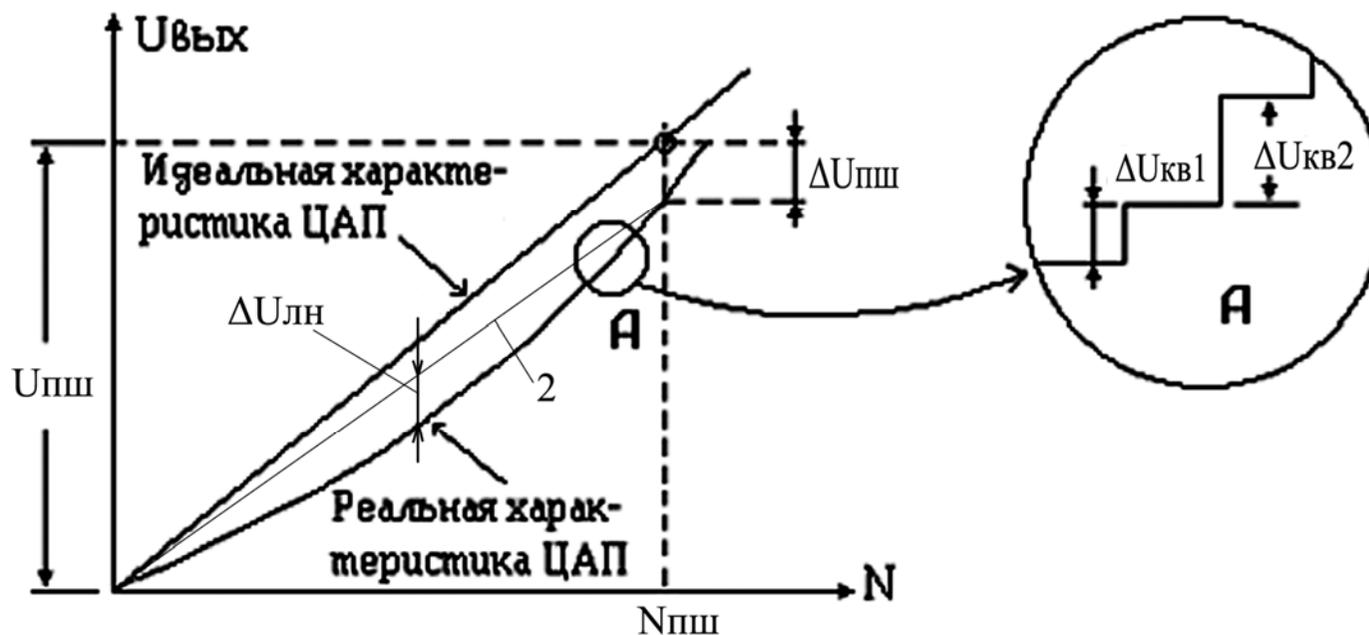
Погрешности ЦАП

1) Погрешность полной шкалы (абсолютная погрешность преобразования)

показывает максимальное отклонение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ в точке пересечения с идеальной характеристикой (прямой) на уровне напряжения полной шкалы при максимальном значении входного кода $N_{\text{пш}}$.

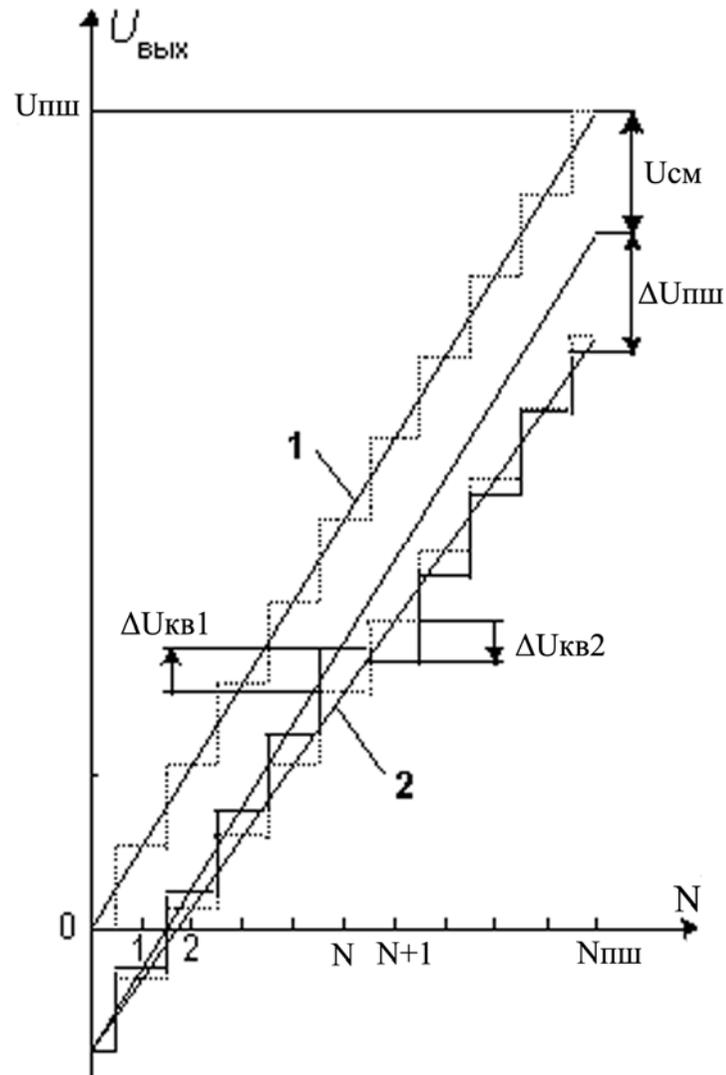
Др. словами, относительная разность между реальным и идеальным значениями предела шкалы преобразования при *отсутствии смещения нуля*.

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



2) Погрешность смещения нуля

- значение $U_{\text{ВЫХ}}$, когда входной код ЦАП равен нулю.



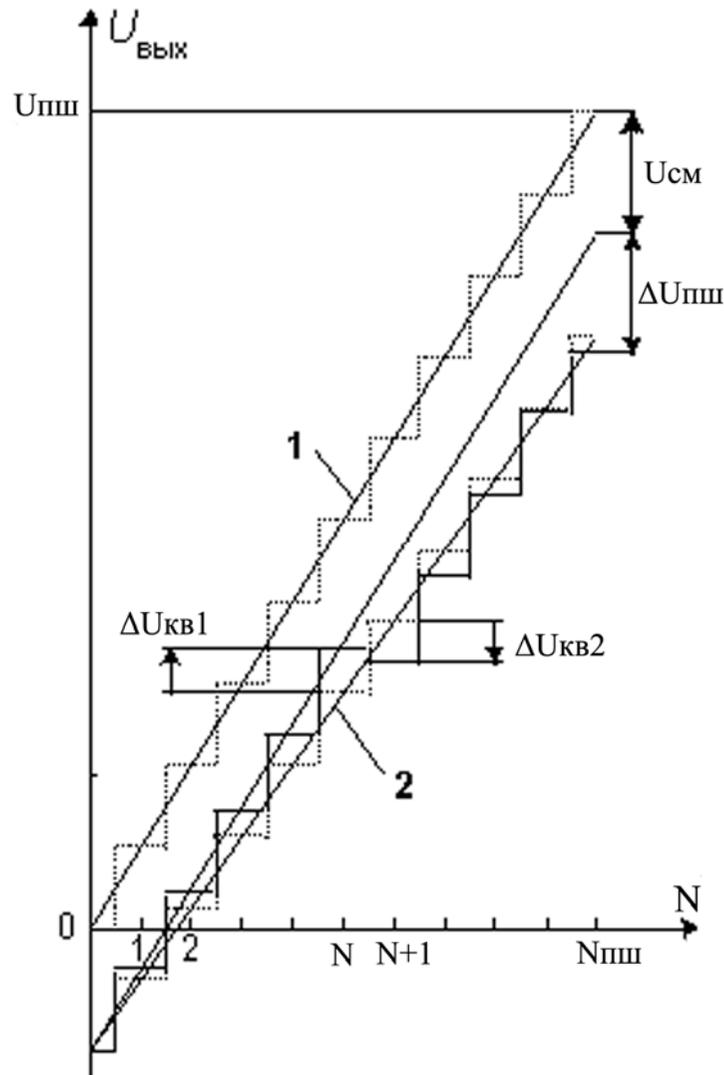
Является аддитивной составляющей полной погрешности.

Обычно указывается в милливольтях или в процентах от полной шкалы.

$$\delta_{CM} = \frac{U_{CM}}{U_{ПШ}} \cdot 100\%$$

3) Погрешность линейности

- определяет максимальное отклонение реальной характеристики преобразования от оптимальной (линия 2).

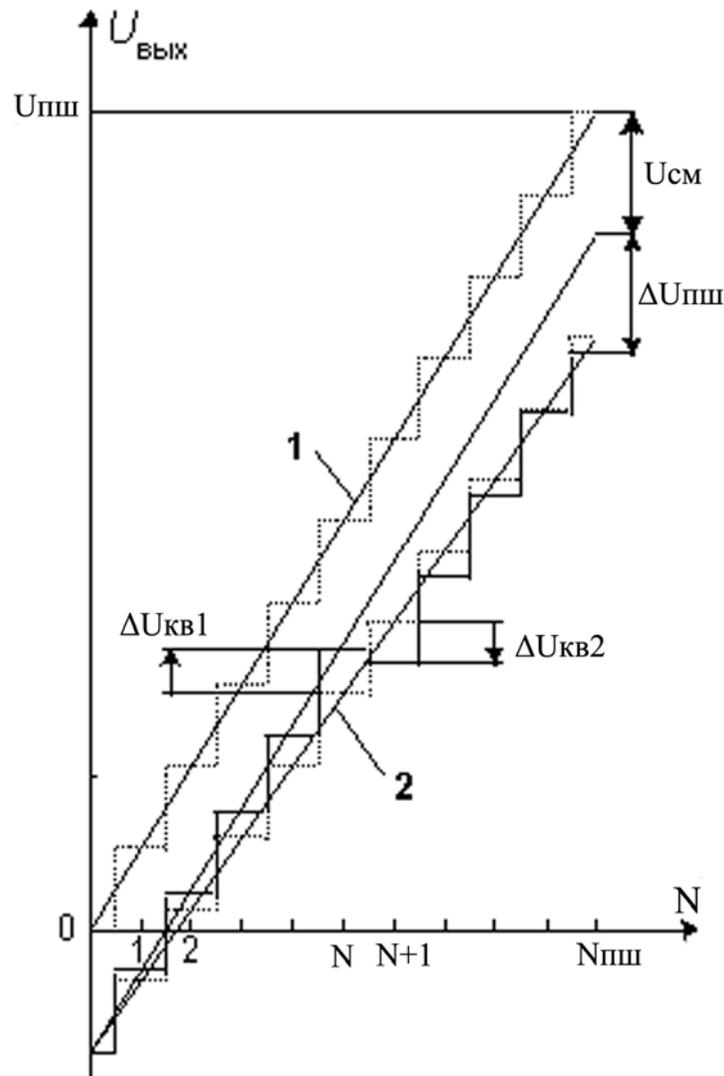


Оптимальная характеристика находится эмпирически так, чтобы минимизировать значение погрешности нелинейности. Часто оптимальную характеристику строят как прямую, соединяющую начальные и конечные точки реальной характеристики

$$\delta_{\text{ЛН}} = \frac{\Delta U_{\text{ЛН}}}{U_{\text{ПШ}}} \cdot 100\%$$

$$\delta_{\text{ЛН}} = \frac{\Delta U_{\text{КВ1}}}{U_{\text{ПШ}}} \cdot 100\%$$

4) Дифференциальная нелинейность



- максимальное изменение отклонения реальной характеристики преобразования $U_{\text{ВЫХ}}(N)$ от оптимальной при переходе от одного значения входного кода к другому смежному значению.

$$\delta_{\text{ДЛ}} = \Delta U_{\text{КВ1}} - \Delta U_{\text{КВ2}}$$

$\Delta U_{\text{КВ1}}$ и $\Delta U_{\text{КВ2}}$ берутся по **модулю**.

В относительных единицах:

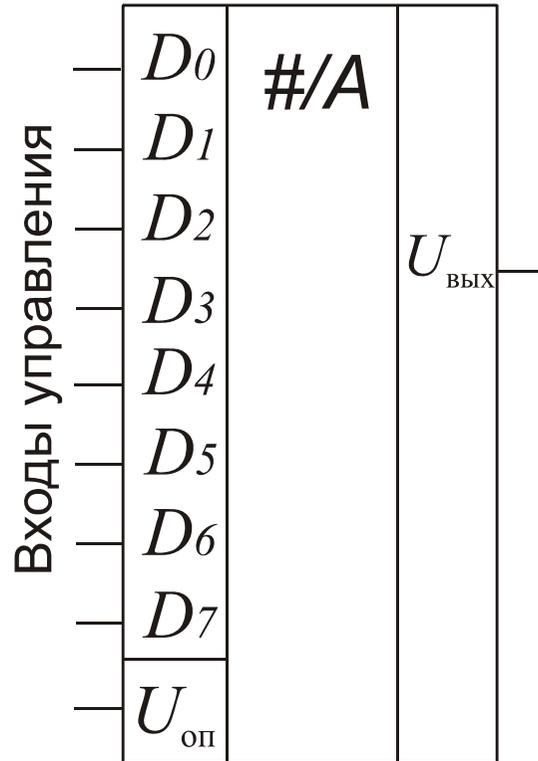
$$\delta_{\text{ДЛ}\%} = \frac{\Delta U_{\text{КВ1}} - \Delta U_{\text{КВ2}}}{U_{\text{ПШ}}} \cdot 100\%$$

В единицах МЗР:

$$\delta_{\text{ДЛ}\%} = \frac{\Delta U_{\text{КВ1}} - \Delta U_{\text{КВ2}}}{U_{\text{КВ}}} \cdot 100\%$$



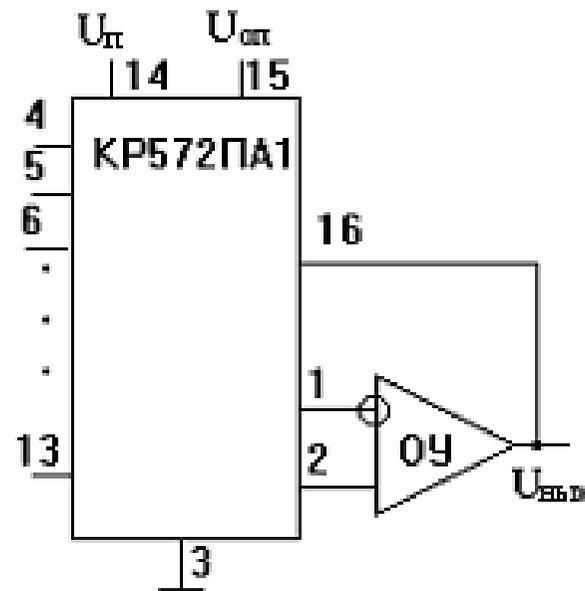
ЦА



Отечественные ЦАП выпускаются в виде ИМС и содержат в своем составе резистивную матрицу R-2R, электронные ключи и резистор обратной связи $R_{ос}$.

Токосуммирующий операционный усилитель подключается дополнительно.

Схема ЦАП на микросхеме КР572ПА1





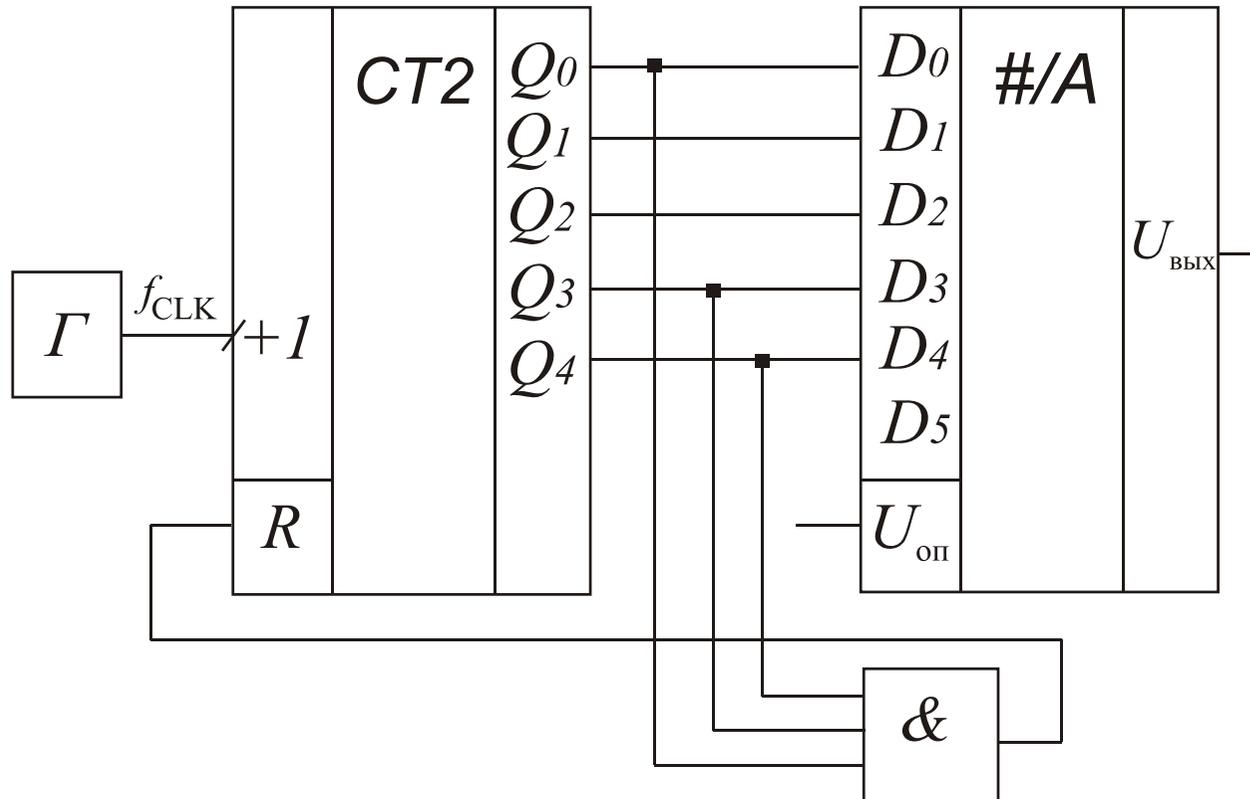
Основные параметры широко используемых отечественных ЦАП

Тип микросхемы	n	$t_{уст}$, мкс	$\delta_{лн}$, %	$U_{п}$, В	$U_{оп}$, В
КР572ПА1	10	5	0.1 ... 0.8	+5 ... +17	10.24
КР572ПА2	12	15	0.02 ... 0.1	+5; +15	10.24
К594ПА1	12	3.5	0.02	-15	10.24
К1108ПА1	12	0.4	0.02	+5; -5	10.24
К417ПА1	13	15	0.02*	± 5 ; 15; 12	9...11
К417ПА2	13	15	0.02*	± 15 ; 5; 12	10
* для группы Б – 0.1; для группы В – 0.3					

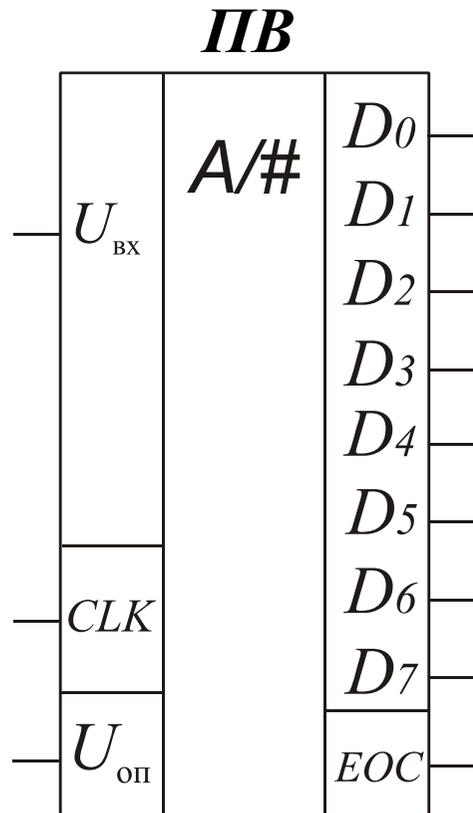


Задача.

Нарисовать характеристику преобразования ЦАП, представленного на рисунке. $U_{оп} = 9.6$ В, $f_{CLK} = 5$ кГц. Определить время преобразования и максимальное напряжение $U_{вых}$ ЦАП.



2. Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП)



АЦП предназначены для преобразования аналоговых (непрерывных) сигналов в цифровую форму. Преобразование аналогового сигнала происходит в определенные моменты времени, которые называются *точками отсчета*. Количество отсчетов за единицу времени определяет *частоту дискретизации (преобразования)*, которая, в свою очередь, определяется быстродействием и условиями использования АЦП.

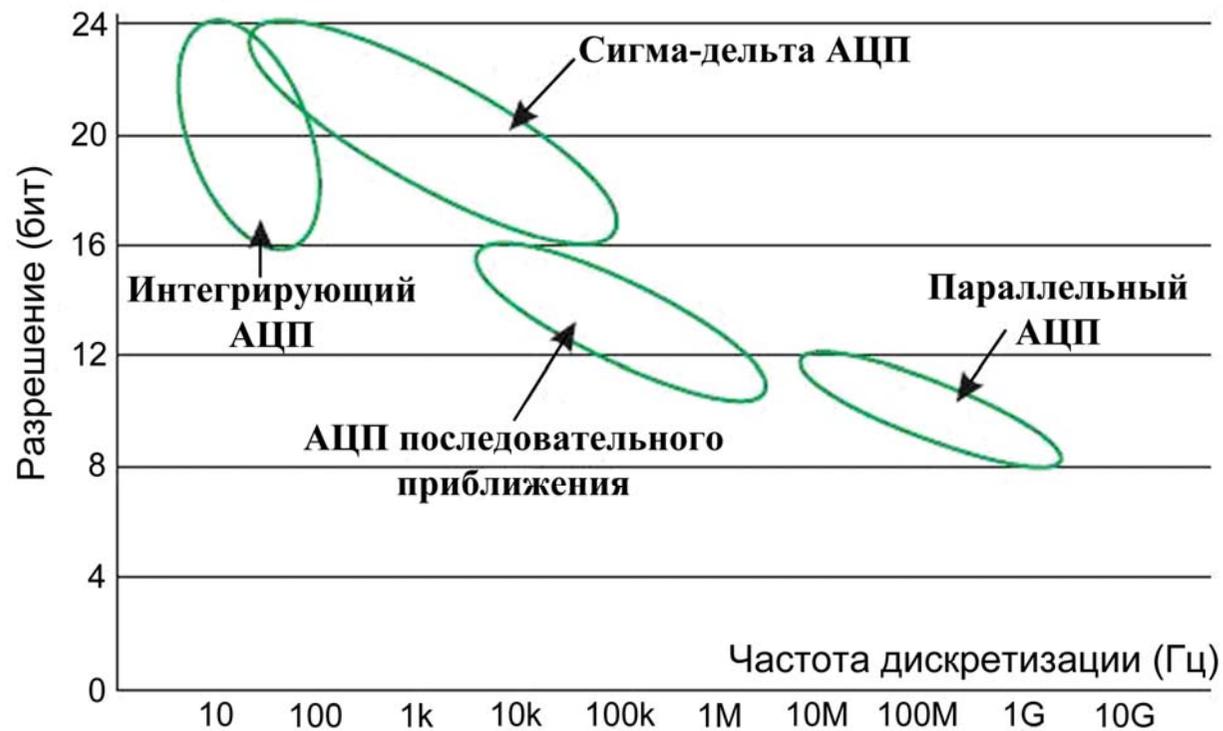
Частота дискретизации (или частота преобразования) – частота взятия отсчетов непрерывного во времени сигнала при его дискретизации. Измеряется в Герцах.

Интервал времени между отсчетами $T_{\text{отс}}$: $T_{\text{отс}} = 1/f_{\text{д}}$



Классификация АЦП:

- АЦП параллельного преобразования (параллельные АЦП);
- АЦП последовательного приближения, АЦП последовательного счета;
- Интегрирующие АЦП;
- Сигма-дельта АЦП.

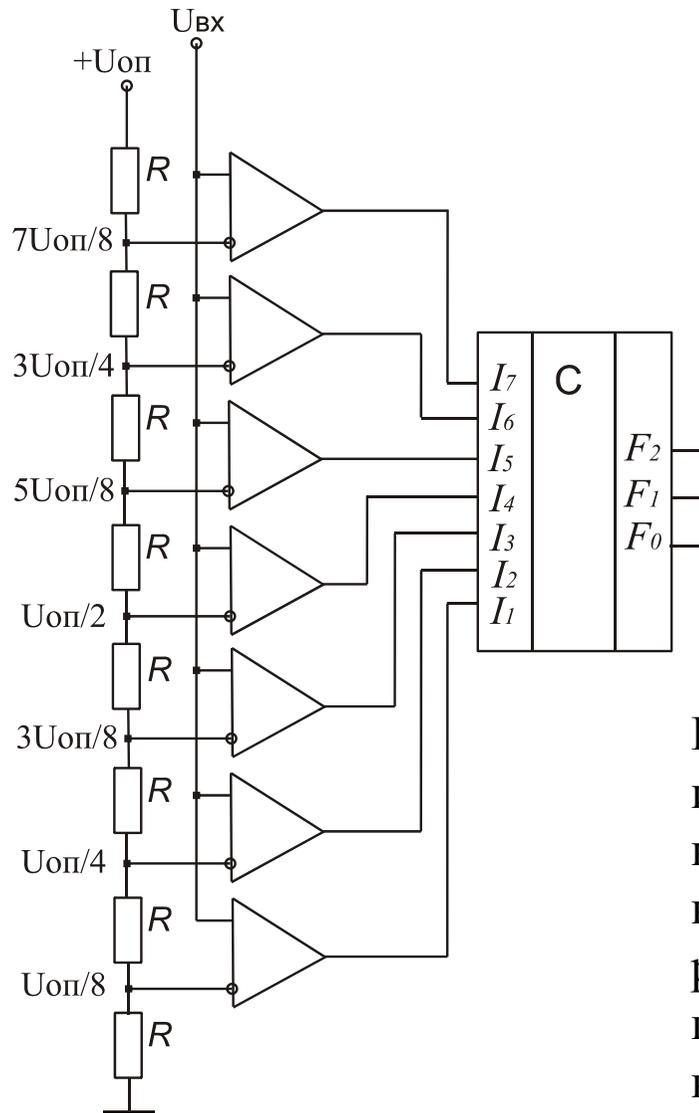


Типы АЦП. Зависимость разрешения от частоты дискретизации



2.1 Параллельные АЦП

используется массив компараторов, каждый из которых сравнивает входное напряжение с индивидуальным опорным напряжением.



Опорное напряжение для каждого компаратора формируется на встроенном прецизионном резистивном делителе. Значения опорных напряжений начинаются со значения, соответствующего младшему значащему разряду, и увеличиваются при переходе к каждому следующему компаратору с шагом, равным $U_{оп}/2^n$. В результате для 3-х разрядного АЦП требуется 2^3-1 или семь компараторов. Для 8-разрядного параллельного АЦП потребуется уже 255 (или (2^8-1)) компараторов.

Пример. $U_{оп}/2 < U_{вх} < 5U_{оп}/8$, тогда $U_{вх}$ попадает в интервал между $U_{оп}/2$ и $5U_{оп}/8$, таким образом, 4 нижних компаратора (младшие разряды) имеют на выходе "1", а верхние три компаратора (старшие разряды) - "0". Шифратор (приоритетный) преобразует 7 - разрядное цифровое слово с выходов компараторов в двоичный код (100_2) .



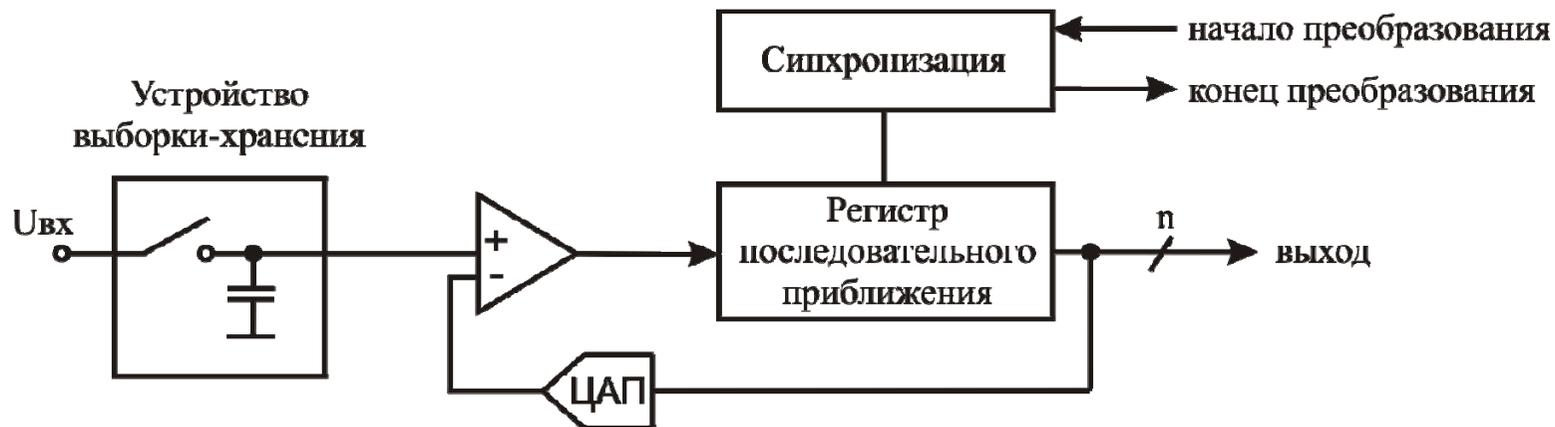
Область применения параллельных АЦП – высокоскоростные устройства

Большинство высокоскоростных осциллографов и некоторые высокочастотные измерительные приборы используют параллельные АЦП из-за их высокой скорости преобразования, которая может достигать 5Г ($5 \cdot 10^9$) отсчетов/сек для стандартных устройств и 20Г отсчетов/сек для оригинальных разработок.

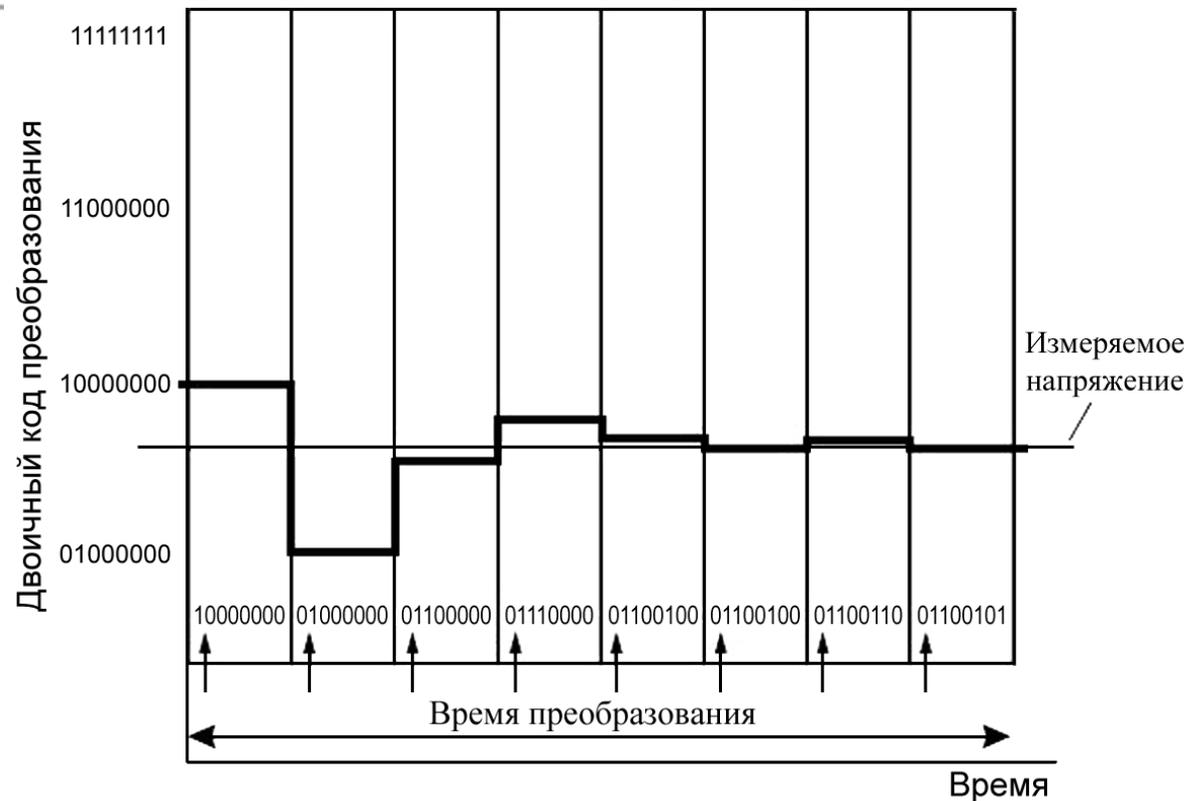
Обычно параллельные АЦП имеют разрешение до 8 разрядов, но встречаются также 10-ти разрядные версии.

Недостаток таких АЦП: из-за необходимости использовать большое количество компараторов параллельные АЦП потребляют значительную мощность, и их нецелесообразно использовать в приложениях с батарейным питанием.

2.2.1 АЦП последовательного приближения



В основе АЦП данного типа лежит специальный **регистр последовательного приближения**. В начале цикла преобразования все выходы этого регистра устанавливаются в логический “0”, за исключением **старшего** разряда. Это формирует на выходе внутреннего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) сигнал, значение которого равно **половине** входного диапазона АЦП. А выход компаратора переключается в состояние, определяющее разницу между сигналом на выходе ЦАП и измеряемым входным напряжением. Это состояние записывается в **старший разряд** n . Затем в следующий разряд $(n-1)$ принудительно записывается «1». Это формирует на выходе внутреннего ЦАП напряжение $U_{\text{вых}}$, значение которого равно либо $\frac{1}{4}$, либо $\frac{3}{4}$ входного диапазона АЦП. Полученное напряжение $U_{\text{вых}}$ ЦАП сравнивается с $U_{\text{вх}}$, результат записывается в $(n-1)$ разряд. И так далее.



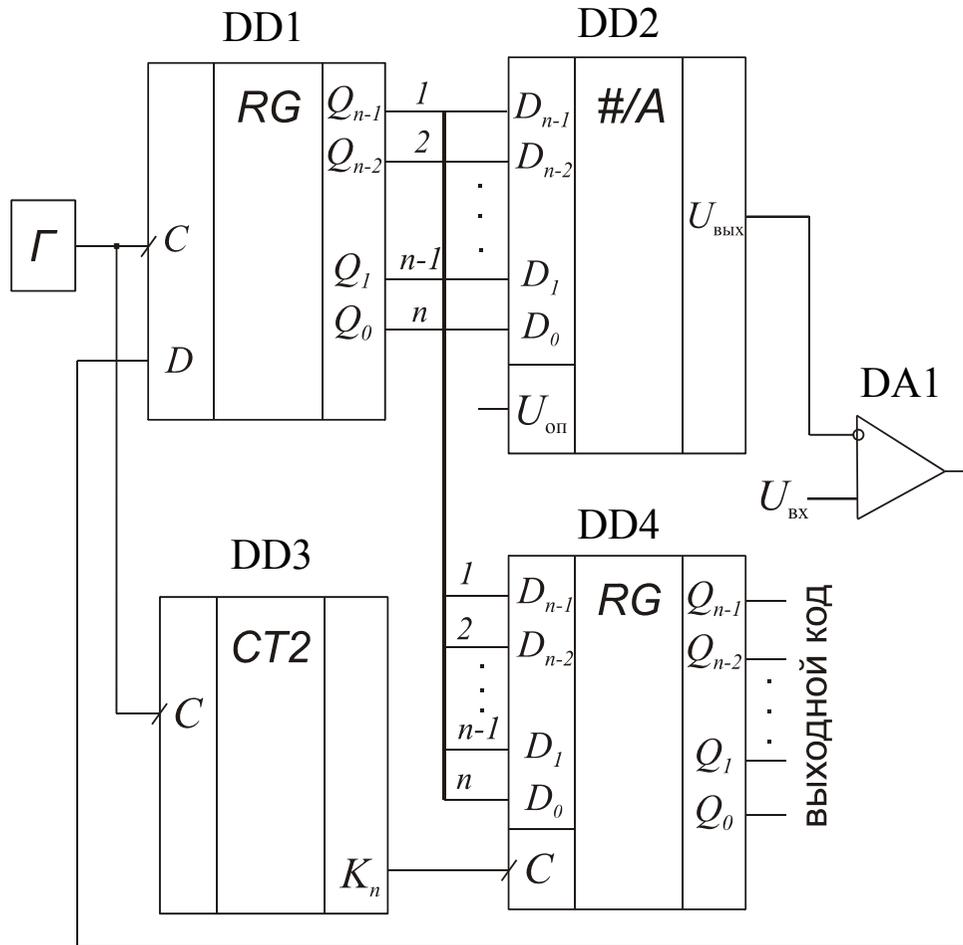
В начале цикла преобразования все выходы этого регистра устанавливаются в логический «0», **старший** (т.е. 8) в «1». На выходе внутреннего ЦАП формируется сигнал, значение которого равно **половине** входного диапазона АЦП (входной диапазон, как правило равен $U_{оп}$). Измеряемое напряжение меньше, значит в **старший разряд** записывается «0». Затем в **следующий разряд** – 7 принудительно записывается «1». Это формирует на выходе внутреннего ЦАП напряжение, значение которого равно 1/4 входного диапазона АЦП. Измеряемое напряжение больше, значит в **7 разряд** записывается «1».

В **6 разряд** записывается «1», $U_{ЦАП} = 3/8 U_{оп}$. $U_{вх} > U_{ЦАП} \Rightarrow$ в 6-м разряде будет «1».

Аналогично, в 5-м разряде будет «0», в 4-м «0», в 3-м «1», во 2-м «0», в 1-м «1».



Принципиальная схема возможной реализации АЦП последовательного приближения с использованием ЦАП и регистра последовательного приближения.



Пример.

Осуществить преобразование входного напряжения 8.55В в восьмиразрядный двоичный код. $U_{оп} = 10В$

Решение.

5-й такт: $Q_{DD1} = 11011000_2$

$U_{вых DD2} = 27/32 U_{оп} = 8.4375В < U_{вх},$

то $U_{вых DA1} = "1" \Rightarrow Q_3 = "1".$

6-й такт: $Q_{DD1} = 11011100_2$

$U_{вых DD2} = 55/64 U_{оп} = 8,59375 > U_{вх},$

то $U_{вых DA1} = "0" \Rightarrow Q_2 = "0".$

7-й такт: $Q_{DD1} = 11011010_2$

$U_{вых DD2} = 109/128 U_{оп} = 8,515625 < U_{вх},$

то $U_{вых DA1} = "1" \Rightarrow Q_1 = "1".$

8-й такт: $Q_{DD1} = 11011011_2$

$U_{вых DD2} = 219/256 U_{оп} = 8,5546875 > U_{вх},$

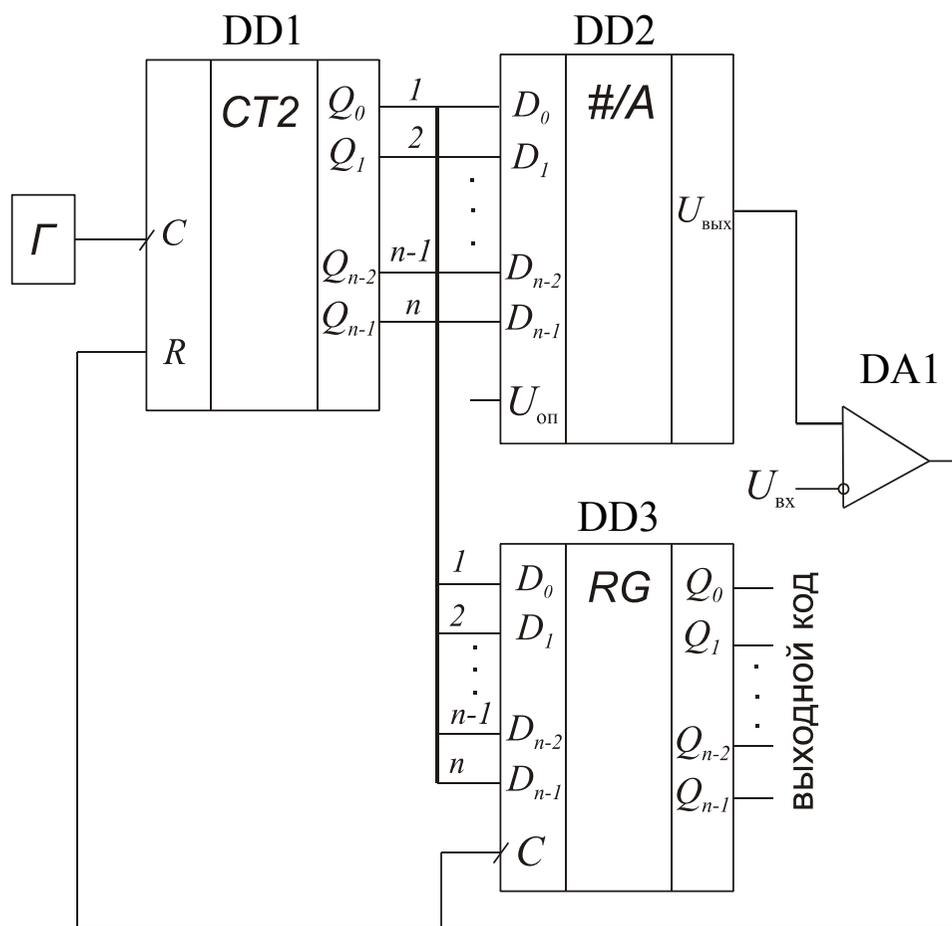
то $U_{вых DA1} = "0" \Rightarrow Q_0 = "0".$

$t_{преобразования} = 2 \cdot n \cdot t_{генератора}$

Итого: $Q_{DD4} = 11011010_2 = 218_{10}$

2.2.2 АЦП последовательного счета

построен по принципу, когда напряжение на выходе внутреннего ЦАП постепенно нарастает. В этом случае $U_{\text{ВХ}}$ подается на инвертирующий вход компаратора, а $U_{\text{ВЫХ}}$ внутреннего ЦАП на неинвертирующий.

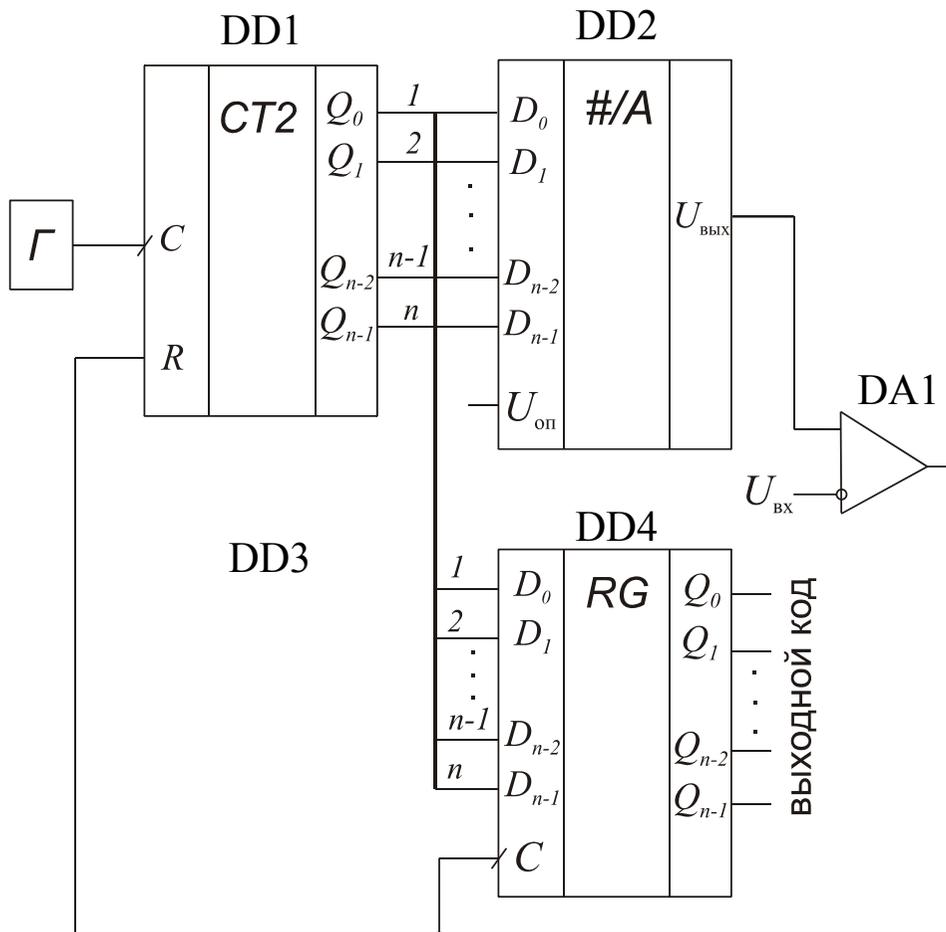


Цикл преобразования начинается с установки счетчика в нулевое состояние. Нулевой код поступает на вход ЦАП, на выходе ЦАП формируется $U_{\text{ВЫХ}} = 0$. $U_{\text{ВЫХ}}$ сравнивается с $U_{\text{ВХ}}$. Если $U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВЫХ}}$, то на выходе компаратора “0”, и “0” поступает на вход сброса R счетчика и вход записи C регистра памяти. Регистр находится в режиме хранения. Т.к. R=0 (неактивный), то с приходом тактовых импульсов счетчик увеличивает выходной код, который поступает на вход ЦАП. $U_{\text{ВЫХ}}$ увеличивается и в момент, когда $U_{\text{ВЫХ}}$ превысит $U_{\text{ВХ}}$, на выходе компаратора появится “1”. В этот момент R = C = “1”, произойдет запись выходного кода счетчика в регистр и сброс счетчика в нулевое состояние. Преобразование закончилось, цикл повторяется снова.

$$t_{\text{преобразования}} = 2^n \cdot t_{\text{генератора}}$$

Пример.

Осуществить преобразование входного напряжения 8.55В в восьмиразрядный двоичный код. $U_{оп} = 10В$



Решение.

1-й такт: $Q_{DD1} = 00000000_2$

$U_{\text{вых DD2}} = 0 < U_{\text{вх}}$, то

$U_{\text{вых DA1}} = "0" \Rightarrow$ счет продолжается.

2-й такт: $Q_{DD1} = 00000001_2$

$U_{\text{вых DD2}} = U_{\text{кв}} = U_{\text{оп}}/255 < U_{\text{вх}}$, то

$U_{\text{вых DA1}} = "0" \Rightarrow$ счет продолжается.

3-й такт: $Q_{DD1} = 00000010_2$

$U_{\text{вых DD2}} = 2U_{\text{кв}} < U_{\text{вх}}$, то

$U_{\text{вых DA1}} = "0" \Rightarrow$ счет продолжается.

Счет закончится, когда $U_{\text{вых DA1}} = "1"$,

т.е. $U_{\text{вых DD2}} > U_{\text{вх}}$. Содержимое счетчика можно определить как

$N = U_{\text{вх}}/U_{\text{кв}} = 8.55/(10/255) = 218,025$,

т.е. $N = 219$

Итого: $Q_{DD4} = 219_{10} = 11011011_2$



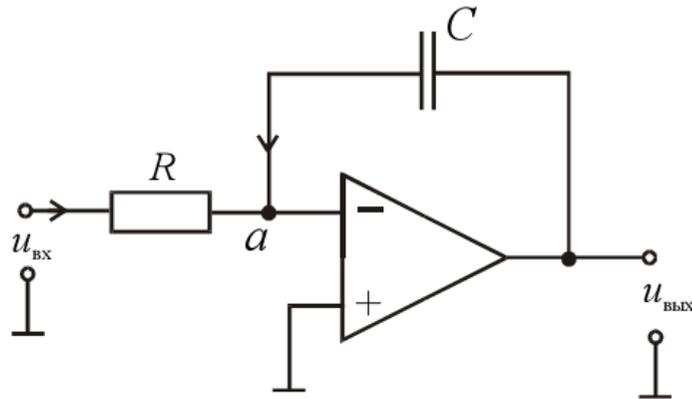
Области применения АЦП последовательного приближения /счета

Когда необходимо разрешение 12, 14 или 16 разрядов и не требуется высокая скорость преобразования, а определяющими факторами являются невысокая цена и низкое энергопотребление, то обычно применяют АЦП последовательного приближения или последовательного счета.

Такие АЦП чаще всего используется в разнообразных измерительных приборах и в системах сбора данных (например, термометрия, звукозапись, медицинское оборудование).

В настоящий момент АЦП последовательного приближения /счета позволяют измерять напряжение с точностью до 16 разрядов с частотой дискретизации от 100К ($1 \cdot 10^3$) до 1М ($1 \cdot 10^6$) отсчетов/сек.

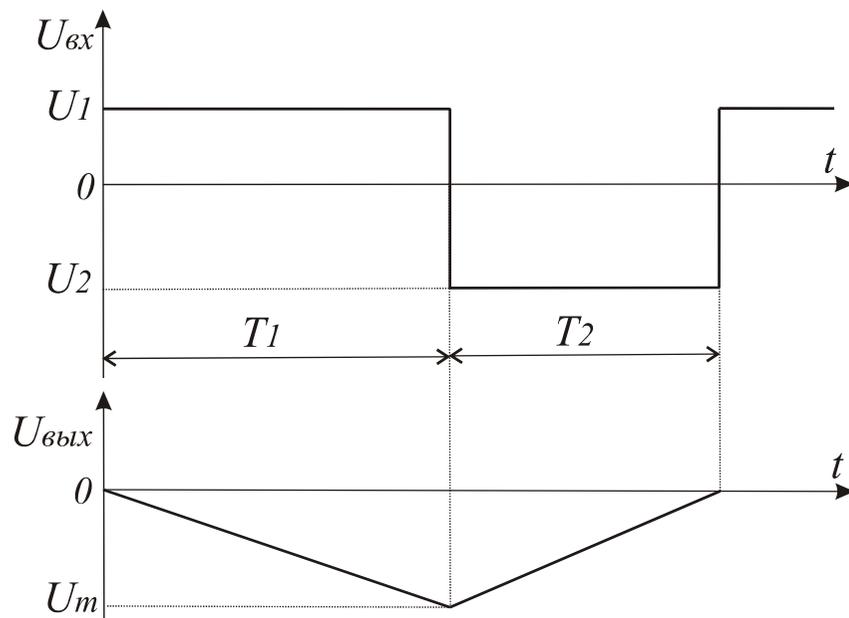
2.3 Интегрирующие АЦП



Основным элементом интегрирующего АЦП является интегратор, построенный на основе операционного усилителя. Если считать ОУ идеальным, то выходное напряжение можно определить, как

$$\frac{U_{\text{ВХ}}}{R} = -C \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt}, \quad u_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{RC} \int u_{\text{ВХ}} dt + A,$$

где A – постоянная, учитывающая начальные условия.



Цикл преобразования АЦП состоит из двух операций:

1) преобразование входного напряжения во время $U_{\text{ВХ}} \rightarrow T$ (ПНВ), либо преобразование входного напряжения в частоту $U_{\text{ВХ}} \rightarrow f$ (ПНЧ).

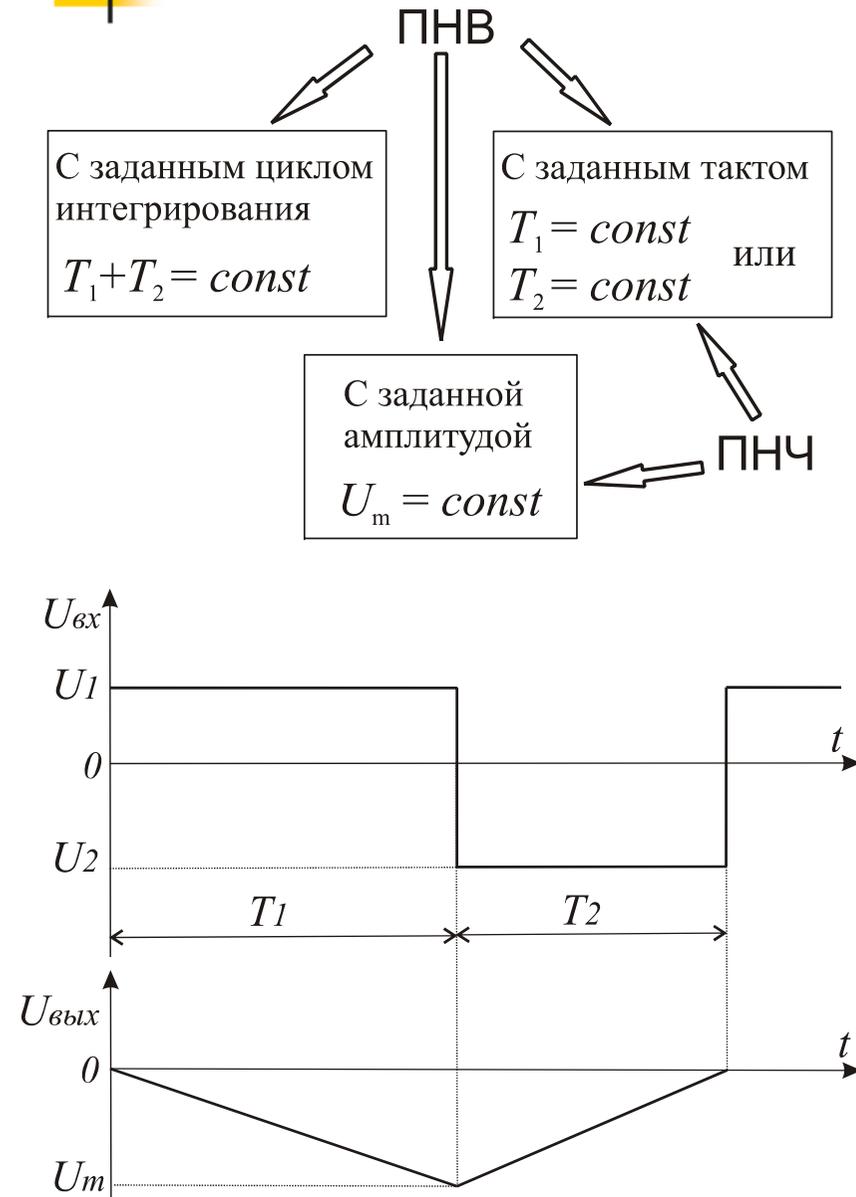
2) измерение времени или частоты.

$$U_1 \cdot T_1 + U_2 \cdot T_2 = 0 \quad \text{или}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

Типы интегрирующих АЦП

ПНВ – преобразователи «напряжение-время»
 ПНЧ – преобразователи «напряжение-частота»



1) ПНВ с заданным циклом

$$U_1 = U_{ВХ} - U_{ОП}; U_2 = U_{ВХ} + U_{ОП}$$

$$(U_{ВХ} - U_{ОП}) \cdot T_1 + (U_{ВХ} + U_{ОП}) \cdot T_2 = 0$$

$$U_{ВХ} \cdot (T_1 + T_2) - U_{ОП} \cdot (T_1 - T_2) = 0$$

$$U_{ВХ} = U_{ОП} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} = k(T_1 - T_2)$$

2) ПНВ с заданным тактом

$$U_1 = U_{ВХ}; U_2 = -U_{ОП}; T_1 = const$$

$$U_{ВХ} \cdot T_1 - U_{ОП} \cdot T_2 = 0$$

$$U_{ВХ} = U_{ОП} \cdot \frac{T_2}{T_1} = kT_2$$

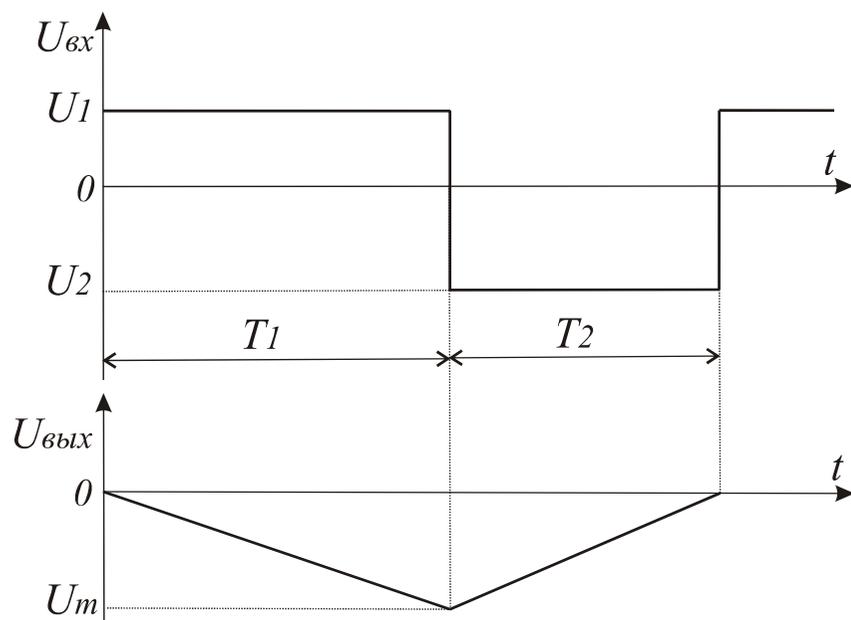
3) ПНВ с заданной амплитудой

$$U_1 = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ОП}}; \quad U_2 = U_{\text{ВХ}} + U_{\text{ОП}}$$

$$(U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ОП}}) \cdot T_1 + (U_{\text{ВХ}} + U_{\text{ОП}}) \cdot T_2 = 0$$

$$(T_1 + T_2) \cdot U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ОП}} \cdot (T_1 - T_2) = 0$$

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ОП}} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2}$$



4) ПНЧ с заданным тактом

$$U_1 = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ОП}}; \quad U_2 = U_{\text{ВХ}}; \quad T_1 = \text{const};$$

$$(U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ОП}}) \cdot T_1 + U_{\text{ВХ}} \cdot T_2 = 0;$$

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ОП}} \cdot \frac{T_1}{T_1 + T_2} = U_{\text{ОП}} \cdot T_1 \cdot f = k \cdot f$$

5) ПНЧ с заданной амплитудой

$$U_1 = U_{\text{ВХ}}; \quad U_2 = -U_{\text{ВХ}}$$

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{1}{\frac{U_m}{U_{\text{ВХ}}} \cdot \tau + \frac{U_m}{U_{\text{ВХ}}} \cdot \tau} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_m \cdot \tau \cdot 2}$$

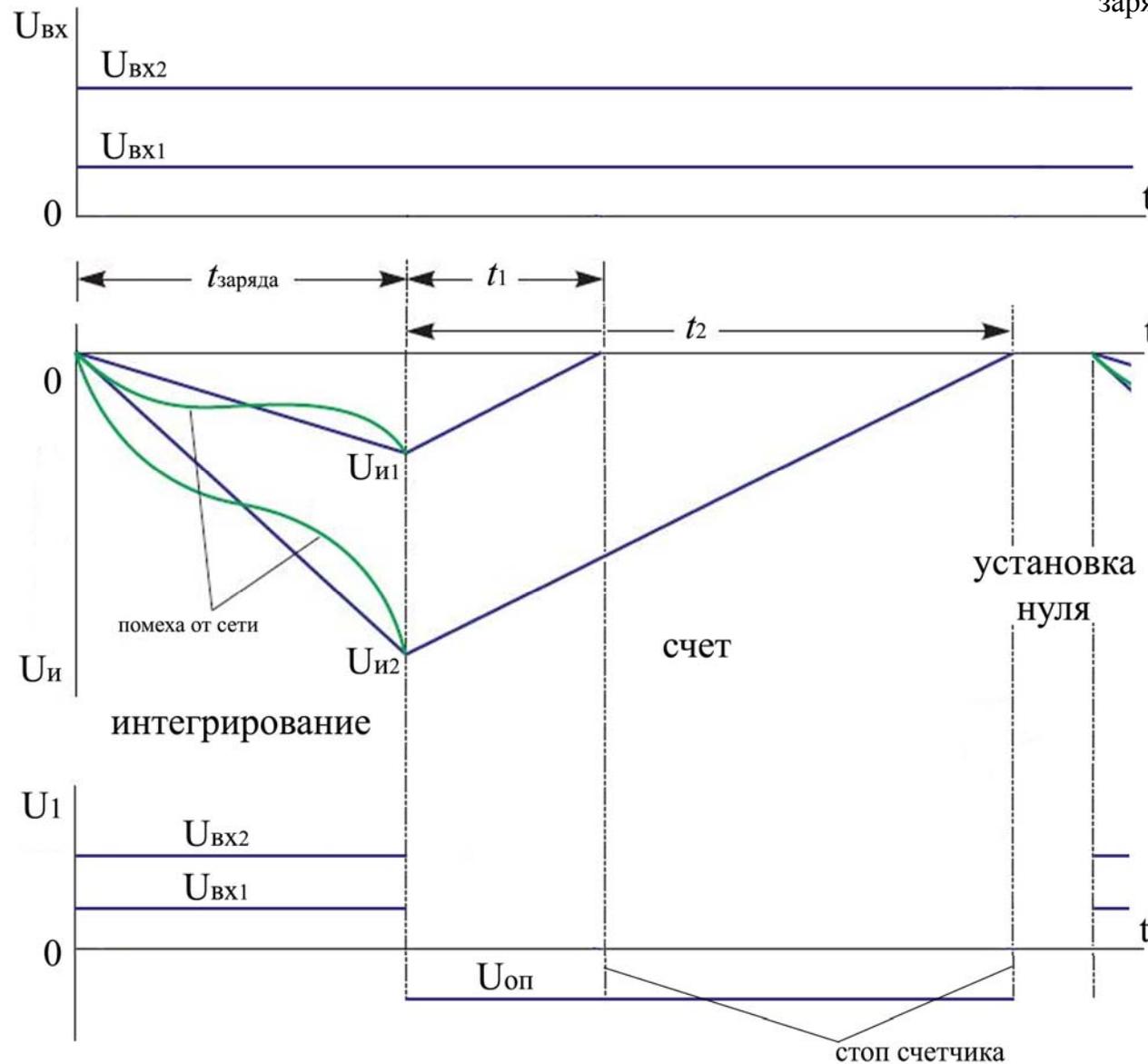
$$U_{\text{ВХ}} = f \cdot U_m \cdot \tau \cdot 2 = k \cdot f, \quad \text{где}$$

$$\tau = RC$$

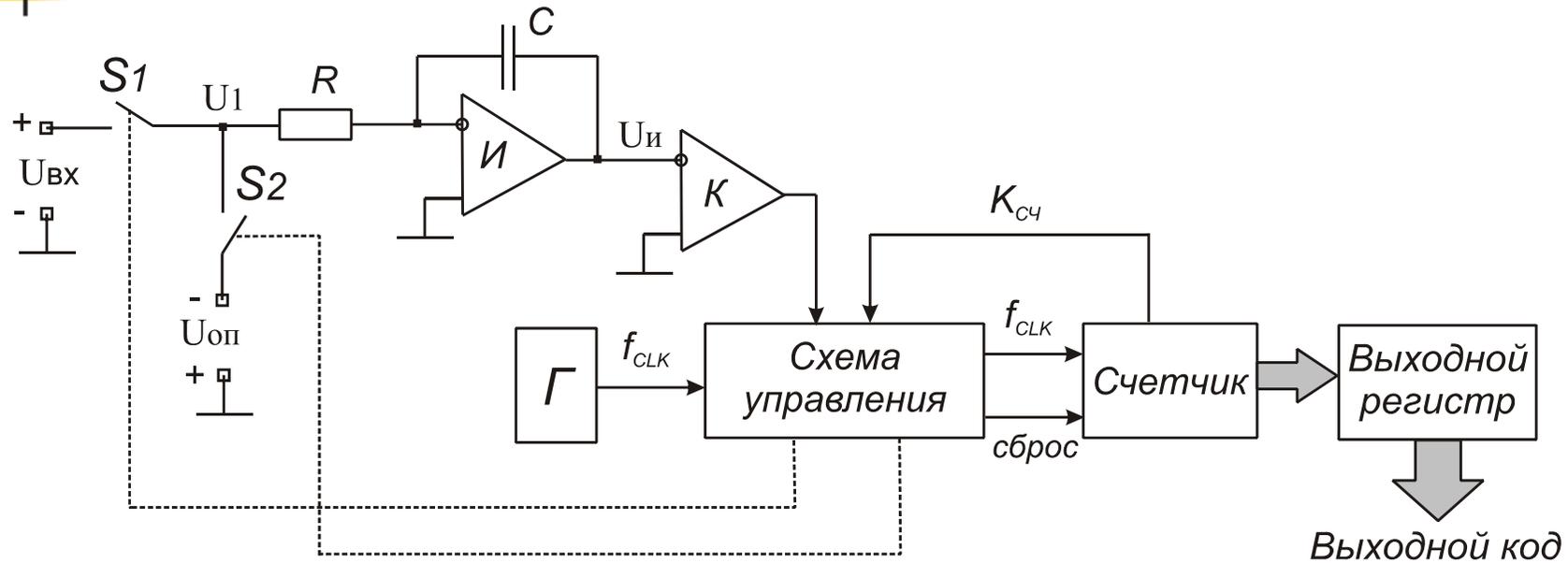


АЦП двухтактного интегрирования с заданным тактом

$$t_{\text{заряда}} = \text{const}$$



Упрощенная схема АЦП двухтактного интегрирования с заданным тактом



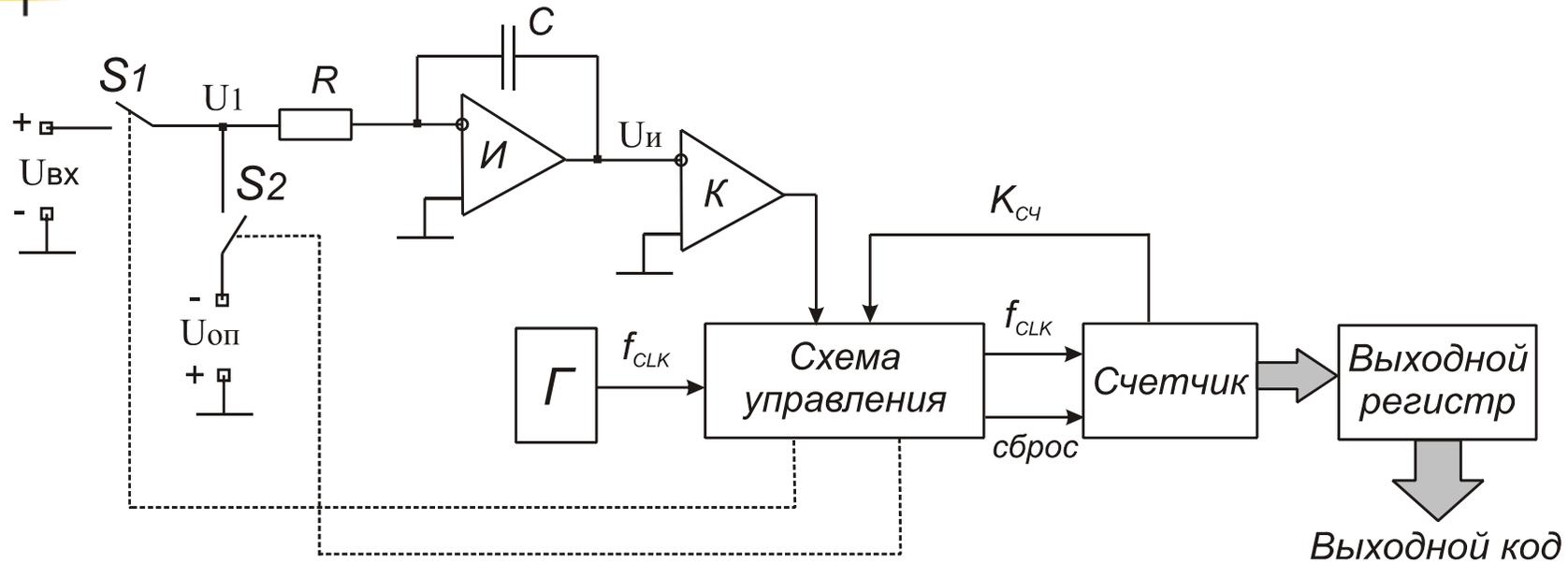
В стадии интегрирования ключ S_1 замкнут, а ключ S_2 разомкнут. Интегратор $И$ интегрирует входное напряжение $U_{ВХ}$. Время интегрирования входного напряжения $t_{заряда}$ постоянно; в качестве таймера используется счетчик с коэффициентом счета $K_{сч}$, так что

$$t_{заряда} = K_{сч}/f_{CLK}$$

К моменту окончания интегрирования $U_{и}$ составляет:

$$U_{и} = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_{заряда}} U_{ВХ}(t) dt = -\frac{U_{ВХ(сред)} K_{сч}}{f_{CLK} RC}$$

Упрощенная схема АЦП двухтактного интегрирования с заданным тактом



После окончания стадии интегрирования ключ S_1 размыкается, а ключ S_2 замыкается, и на вход интегратора поступает опорное напряжение $U_{оп}$. При этом $U_{оп}$ противоположно по знаку входному напряжению. В стадии счета $U_{и}$ линейно уменьшается по абсолютной величине. Стадия счета заканчивается, когда $U_{и}$ переходит через ноль. При этом компаратор переключается и счет останавливается. Стадия счета описывается уравнением:

$$U_{и} + \frac{1}{RC} \int_{t_{заряда}}^{t_1} U_{оп}(t) dt = 0$$



Стадия интегрирования:

$$U_{И} = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_{\text{заряда}}} U_{ВХ}(t) dt = -\frac{U_{ВХ(\text{сред})} K_{СЧ}}{f_{CLK} RC}$$

Стадия счета:

$$U_{И} + \frac{1}{RC} \int_{t_{\text{заряда}}}^{t_1} U_{ОП}(t) dt = 0$$

Содержимое счетчика после окончания стадии счета: $t_1 = \frac{n_1}{f_{CLK}}$

Выходной код:
$$n_1 = \frac{U_{ВХ(\text{сред})} K_{СЧ}}{U_{ОП}}$$

Отличительной особенностью метода двухтактного интегрирования является то, что ни тактовая частота, ни постоянная интегрирования RC не влияют на результат. Достаточно, чтобы тактовая частота в течение времени $(t_{\text{заряда}} + t_1)$ оставалась постоянной.



Задача.

Определить содержимое счетчика после окончания стадии счета, если $U_{\text{вх}} = 7 \text{ В}$, $U_{\text{оп}} = 10 \text{ В}$, $K_{\text{сч}} = 32$, $f_{\text{CLK}} = 50 \text{ кГц}$.



2.4 Сигма-дельта АЦП

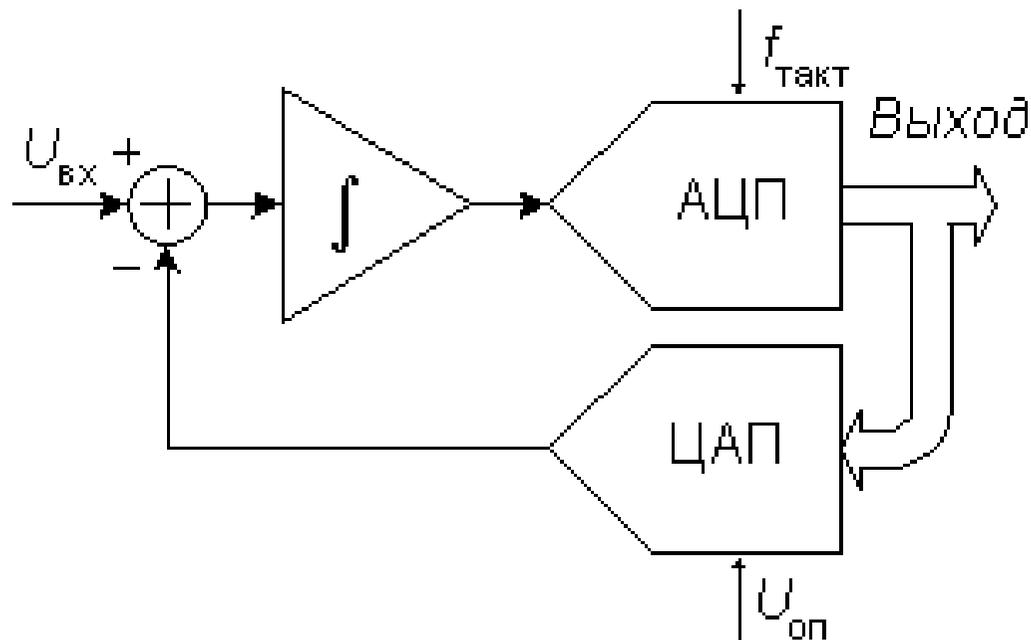
Для проведения измерений часто требуется АЦП с большой разрешающей способностью. Сигма-дельта АЦП могут обеспечивать разрешающую способность до 24 разрядов, но при этом уступают в скорости преобразования. Так, в сигма-дельта АЦП при 16 разрядах можно получить частоту дискретизации до 100К отсчетов/сек, а при 24 разрядах эта частота падает до 1К отсчетов/сек и менее, в зависимости от устройства. Обычно сигма-дельта АЦП применяются в разнообразных системах сбора данных и в измерительном оборудовании (измерение давления, температуры, веса и т.п.), когда не требуется высокая частота дискретизации и необходимо разрешение более 16 разрядов.

Архитектура сигма-дельта АЦП относится к классу интегрирующих АЦП. Но основная **особенность** сигма-дельта АЦП состоит в том, что частота следования выборок, при которых, собственно, и происходит анализ уровня напряжения измеряемого сигнала, существенно превышает частоту появления отсчетов на выходе АЦП (частоту дискретизации). Эта частота следования выборок называется **частотой передискретизации**.

Основные узлы АЦП - это сигма-дельта модулятор и цифровой фильтр.



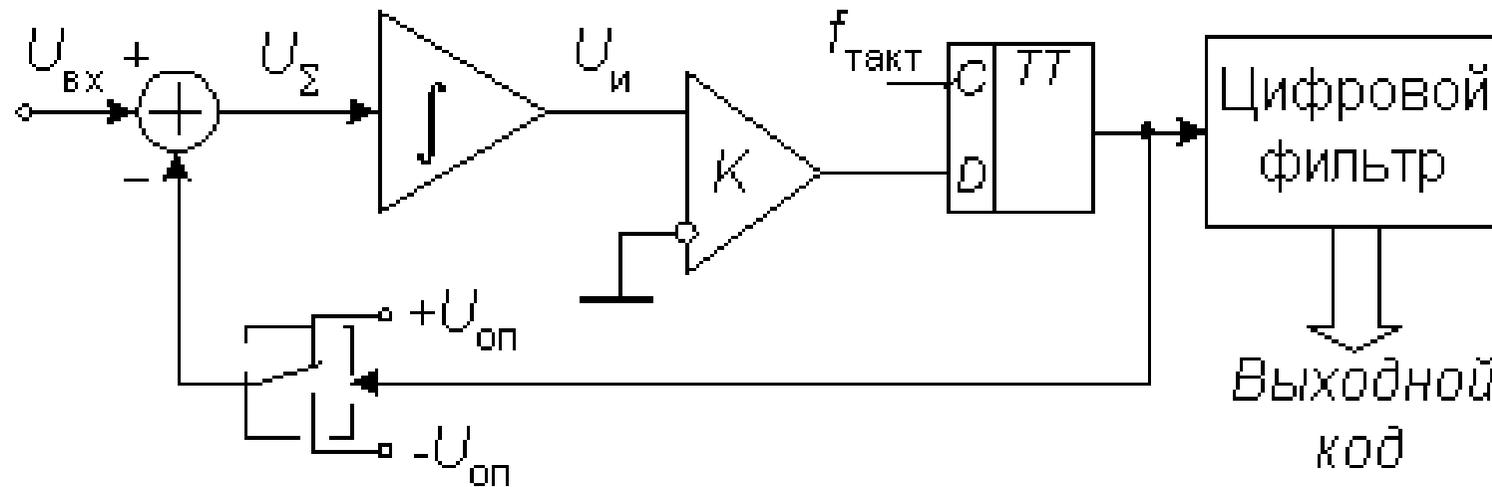
Схема сигма-дельта модулятора



Работа этой схемы основана на вычитании из входного сигнала $U_{вх}$ величины сигнала на выходе ЦАП, полученной на предыдущем такте работы схемы. Полученная разность интегрируется, а затем преобразуется в код параллельным АЦП невысокой разрядности. Последовательность кодов поступает на цифровой фильтр нижних частот.

Наиболее широко в составе ИМС используются однобитные сигма-дельта модуляторы, в которых в качестве АЦП используется компаратор, а в качестве ЦАП - аналоговый коммутатор.

Структурная схема сигма-дельта АЦП



Для формирования выходного кода такого преобразователя необходимо каким-либо образом преобразовать последовательность бит на выходе компаратора в виде унитарного кода в последовательный или параллельный двоичный код. Это можно сделать с помощью двоичного счетчика. В этом случае необходимо выделять фиксированный цикл преобразования, длительность которого равна произведению $K_{сч} \cdot f_{CLK}$. После его окончания должно производиться считывание результата, например, с помощью регистра-защелки и обнуление счетчика.



Пример. Преобразовать $U_{\text{вх}} = 0.6\text{В}$ в цифровой код при $U_{\text{оп}} = 1\text{В}$.

№ такта	$U_{\Sigma}, \text{В}$	$U_{\text{и}}, \text{В}$	$U_{\text{к}}, \text{бит}$	$U_{\text{ЦАП}}, \text{В}$	Код
1	0.6	0.6	1	1	0001
2	-0.4	0.2	1	1	0010
3	-0.4	-0.2	0	-1	0010
4	1.6	1.4	1	1	0011
5	-0.4	1.0	1	1	0100
6	-0.4	0.6	1	1	0101
7	-0.4	0.2	1	1	0110
8	-0.4	-0.2	0	-1	0110
9	1.6	1.4	1	1	0111
10	-0.4	1.0	1	1	1000
11	-0.4	0.6	1	1	1001
12	-0.4	0.2	1	1	1010
13	-0.4	-0.2	0	-1	1010
14	1.6	1.4	1	1	1011
15	-0.4	1.0	1	1	1100
16	-0.4	0.6	1	1	1101



Пример. Преобразовать $U_{\text{вх}} = 0\text{В}$ в цифровой код при $U_{\text{оп}} = 1\text{В}$.

№ такта	$U_{\Sigma}, \text{В}$	$U_{\text{и}}, \text{В}$	$U_{\text{к}}, \text{бит}$	$U_{\text{ЦАП}}, \text{В}$	Код
1	0	0	0	-1	0000
2	1	1	1	1	0001
3	-1	0	0	-1	0001
4	1	1	1	1	0010
5	-1	0	0	-1	0010
6	1	1	1	1	0011
7	-1	0	0	-1	0011
8	1	1	1	1	0100
9	-1	0	0	-1	0100
10	1	1	1	1	0101
11	-1	0	0	-1	0101
12	1	1	1	1	0110
13	-1	0	0	-1	0110
14	1	1	1	1	0111
15	-1	0	0	-1	0111
16	1	1	1	1	1000



Смещенный код, или, как его еще называют, *двоичный код с избытком*, формируется следующим образом.

Сначала выбирается длина разрядной сетки – n и записываются последовательно все возможные кодовые комбинации в обычной двоичной системе счисления. Затем кодовая комбинация с единицей в старшем разряде, имеющая значение 2^{n-1} , выбирается для представления числа 0. Все последующие комбинации с единицей в старшем разряде будут представлять числа 1,2,3,...соответственно, а предыдущие комбинации в обратном порядке – числа -1,-2, -3,...

Номер кодовой комбинации	Код с избытком 4	Десятичное значение
7	111	3
6	110	2
5	101	1
4	100	0
3	011	-1
2	010	-2
1	001	-3
0	000	-4



Номер кодовой комбинации	Код с избытком 8	Десятичное значение
15	1111	7
14	1110	6
13	1101	5
12	1100	4
11	1011	3
10	1010	2
9	1001	1
8	1000	0
7	0111	-1
6	0110	-2
5	0101	-3
4	0100	-4
3	0011	-5
2	0010	-6
1	0001	-7
0	0000	-8



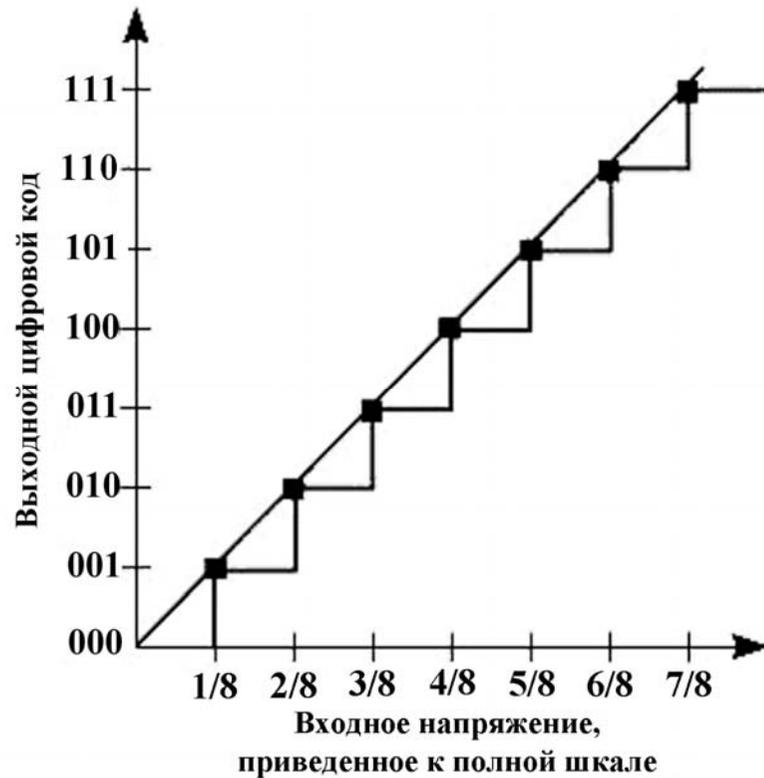
Задача.

Преобразовать $U_{\text{вх}} = -0.6\text{В}$ в цифровой код при $U_{\text{оп}} = 1\text{В}$.

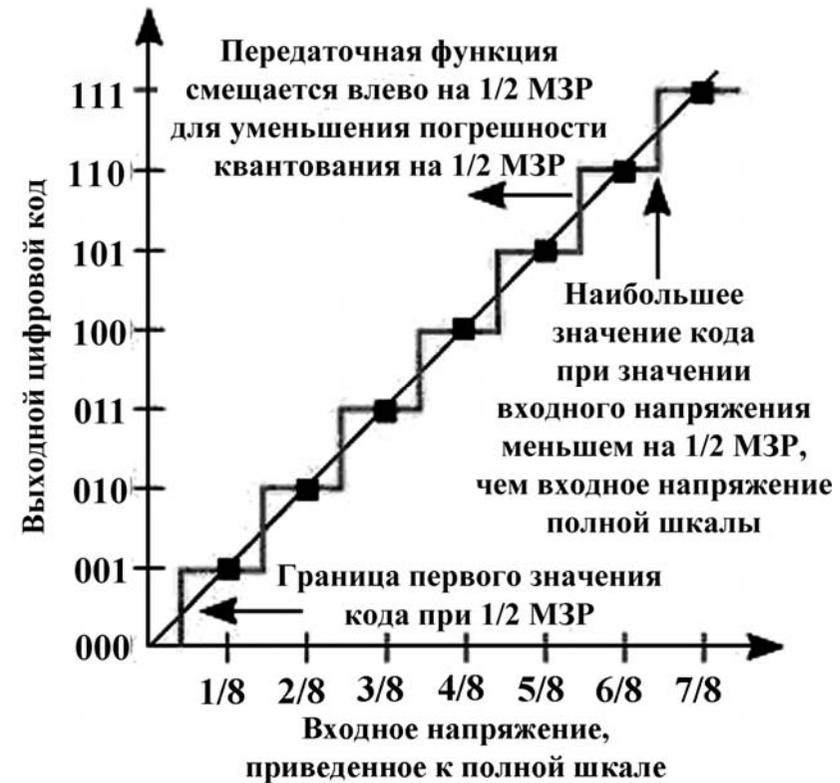


Характеристики АЦП

Передаточная характеристика АЦП $N(U_{вх})$ – это зависимость кода на выходе АЦП от напряжения на его входе.



Идеальная передаточная характеристика 3-х разрядного АЦП



Идеальная передаточная характеристика 3-х разрядного АЦП со смещением на минус $\frac{1}{2}$ МЗР.



Статические параметры

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

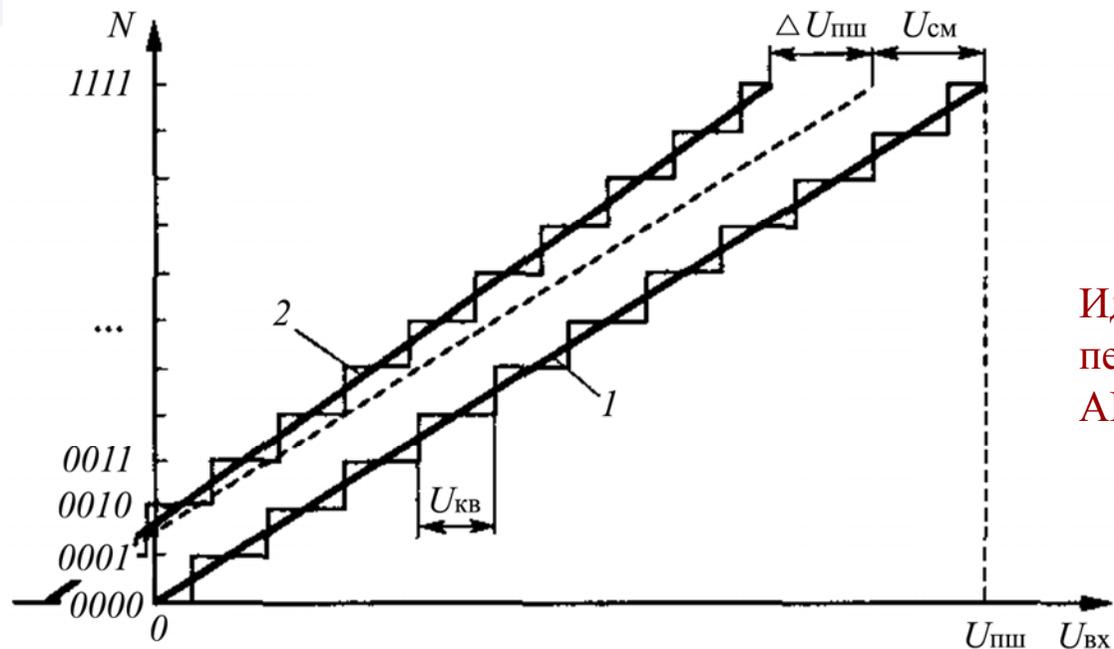
Например, идеальный 12-разрядный АЦП имеет разрешающую способность $1/4096$, или 0.0245% от полной шкалы.

Разрешающей способности соответствует приращение входного напряжения АЦП при изменении выходного кода N на 1 МЗР. Это приращение называется **шагом квантования**.

$$U_{\text{кв}} = U_{\text{пш}} / (2^n - 1),$$

где $U_{\text{пш}}$ — номинальное значение максимального входного напряжения АЦП (напряжение полной шкалы), соответствующее максимальному значению выходного кода, n – разрядность АЦП.

Точность преобразования характеризует суммарное отклонение результата преобразования от своего идеального значения для данного входного напряжения.

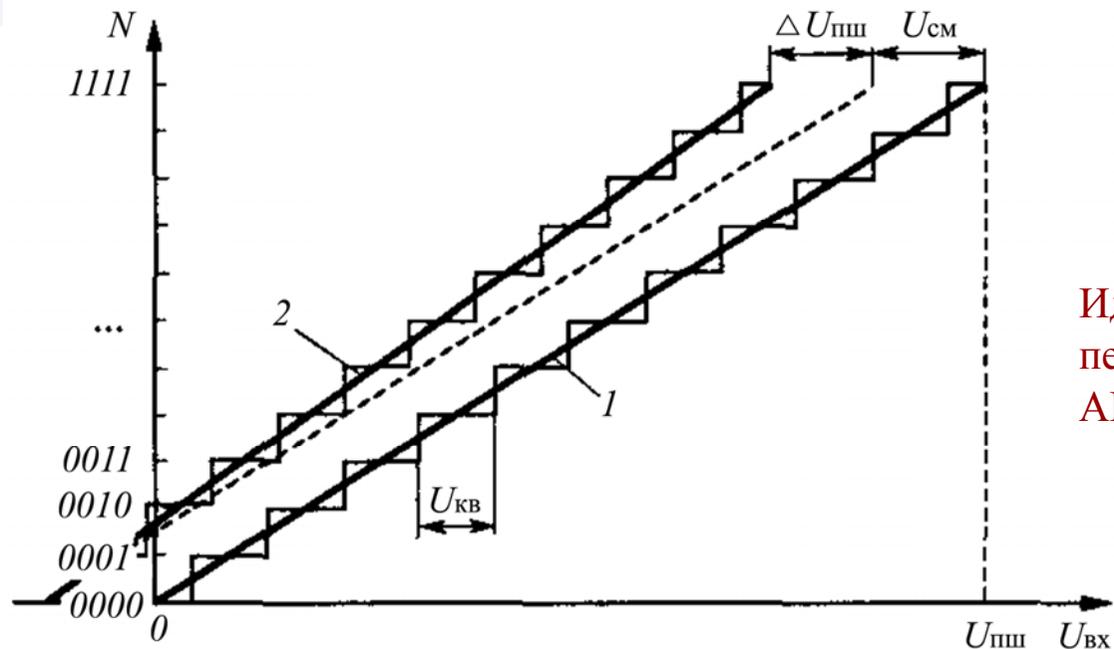


Идеальная (1) и оптимальная (2)
передаточные характеристики
АЦП

2. Погрешность квантования – это погрешность, вызванная значением шага квантования и определяется как $\frac{1}{2}$ МЗР. Она не может быть исключена в аналого-цифровых преобразованиях, так как является неотъемлемой частью процесса преобразования, определяется разрешающей способностью АЦП и не меняется от АЦП к АЦП с равным разрешением.

3. Погрешность полной шкалы – это относительная разность между реальным и идеальным значениями предела шкалы преобразования при отсутствии смещения нуля:

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



Идеальная (1) и оптимальная (2) передаточные характеристики АЦП

4. Погрешность смещения нуля - значение $U_{ВХ}$, когда входной код ЦАП равен нулю. Обычно определяется как $U_{СМ} = U_{ВХ} - U_{КВ}/2$

$$\delta_{СМ} = \frac{U_{СМ}}{U_{ПШ}} \cdot 100\%$$

5. Нелинейность - максимальное отклонение реальной характеристики преобразования $N(U_{ВХ})$ от *оптимальной* (линия 2). Оптимальная характеристика находится, как и для ЦАП, эмпирически так, чтобы минимизировать значение погрешности нелинейности.

$$\delta_{ЛН} = \frac{\Delta U_{ЛН}}{U_{ПШ}} \cdot 100\%$$



Для характеристики,
приведенной на рис. →

$$\delta_{ЛН} = \frac{\Delta U_{ЛН}}{U_{ПШ}} \cdot 100\% = \frac{\Delta U_j}{U_{ПШ}} \cdot 100\%$$

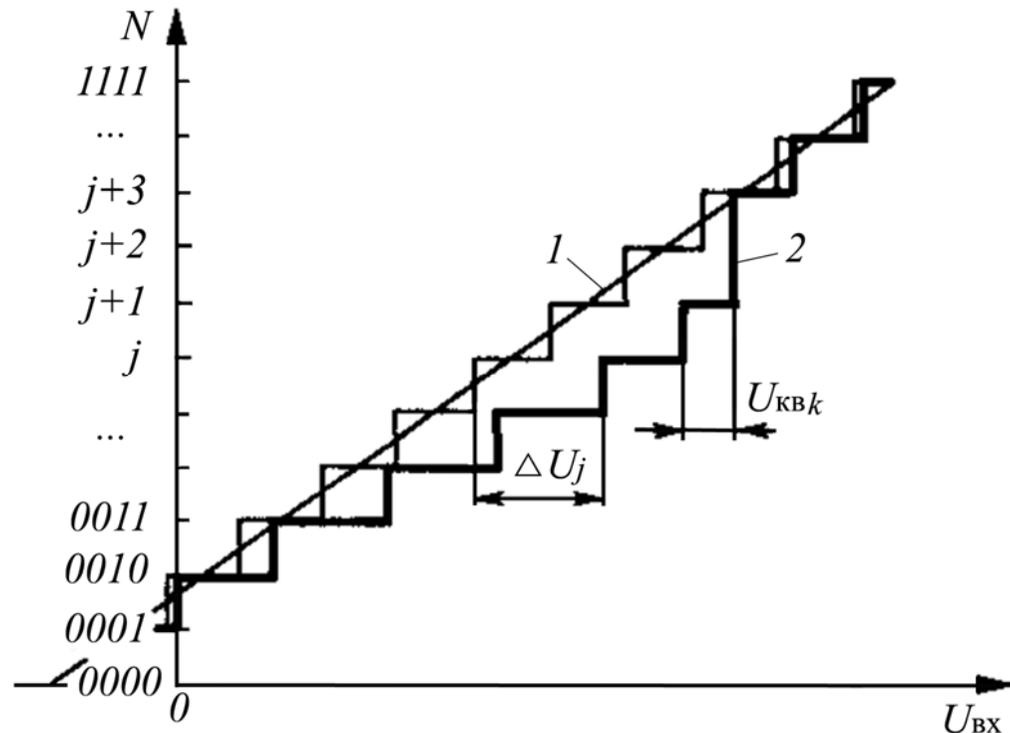
6. Дифференциальная нелинейность

АЦП в точке k характеристики - это разность между значением кванта преобразования $U_{квk}$ и средним значением кванта преобразования $U_{кв}$.
Для характеристики на рис. →

$$\delta_{ДЛ} = \frac{U_{КВk} - U_{КВ}}{U_{ПШ}} \cdot 100\%$$

или в единицах МЗР

$$\delta_{ДЛ\%} = \frac{U_{КВk} - U_{КВ}}{U_{КВ}} \cdot 100\%$$



Оптимальная (1) и реальная (2) передаточные характеристики АЦП. Пример пропадания кода $j+2$.

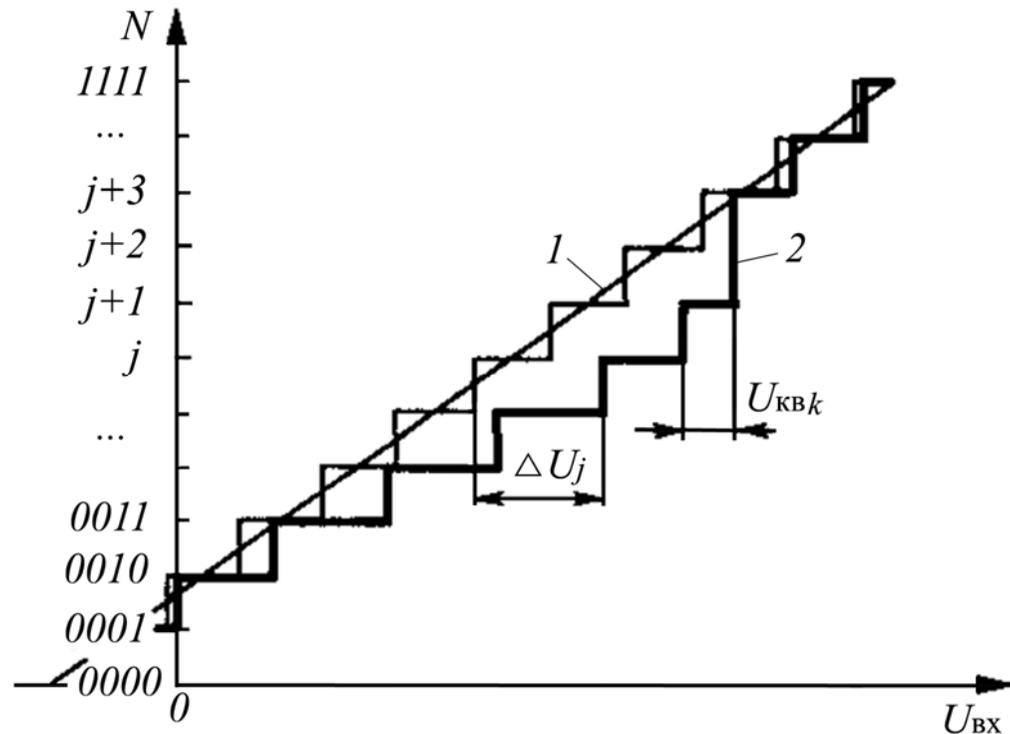
Дифференциальная нелинейность определяет два важных свойства АЦП: *отсутствие пропущенных кодов* и *монотонность характеристики преобразования*.



7. Отсутствие пропущенных кодов

– свойство АЦП выдавать все возможные выходные коды при изменении входного напряжения от начальной до конечной точки диапазона преобразования.

При нормировании отсутствия пропущенных кодов указывается эквивалентная разрядность АЦП – максимальное количество разрядов АЦП, для которых не пропадают соответствующие им кодовые комбинации.



Оптимальная (1) и реальная (2) передаточные характеристики АЦП. Пример пропадания кода $j+2$.

8. Монотонность характеристики преобразования – это неизменность знака приращения выходного кода N при монотонном изменении входного преобразуемого сигнала. Монотонность **не гарантирует** малых значений дифференциальной нелинейности и отсутствия пропущенных кодов.

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



Динамические параметры

1. Максимальная частота дискретизации (преобразования) – это наибольшая частота формирования выборочных значений сигнала, при которой выбранный параметр АЦП не выходит за заданные пределы. Измеряется числом выборок в секунду (SPS – Samples Per Second).

Выбранным параметром может быть, например, монотонность характеристики преобразования или нелинейность.

2. Время преобразования – это время, отсчитываемое от начала импульса дискретизации или начала преобразования до появления на выходе устойчивого кода, соответствующего данной выборке.

3. Время выборки (стробирования) – время, в течение которого происходит образование одного выборочного значения.



Основные параметры широко используемых отечественных АЦП

Тип микросхемы	Тип архитектуры	n	$\delta_{\text{ЛН}}, \%$ (МЗР)	$t_{\text{нр}},$ мкс	$U_{\text{П}}, \text{В}$	$U_{\text{оп}}, \text{В}$	$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	$I_{\text{пот}},$ мА
К572ПВ1А	посл. прибл.	12	0.0488	170	5, 15	± 15	10	5
К1113ПВ1	посл. прибл.	10	2	30	5, -15	± 10	10.24	28
К572ПВ4	посл. прибл.	8	0.5	32	5	0... ± 2.5	2.5	3
К1107ПВ1	парал. преоб.	6	0.78	0.1	+5; -6	-2	0... -2	200
К1107ПВ2	парал. преоб.	8	0.3	0.1	+5; -6	-2	0... -2	450
К1107ПВ3	парал. преоб.	6	0.19	0.02	+5; -5.2	± 2.5	± 2.5	100
К1107ПВ4	парал. преоб.	8	0.38	0.03	+5; -5.2	± 2.5	± 2.5	450