

# **Измерительные преобразователи**

# 1. Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП)

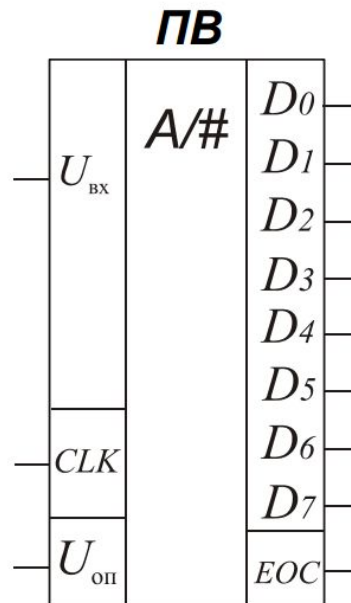
АЦП предназначены для преобразования аналоговых (непрерывных) сигналов в цифровую форму.

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 быстрой и условиями

использования АЦП

Интервал времени между отсчетами  $T_{отс}$ :

$$T_{отс} = 1/f_{д}$$

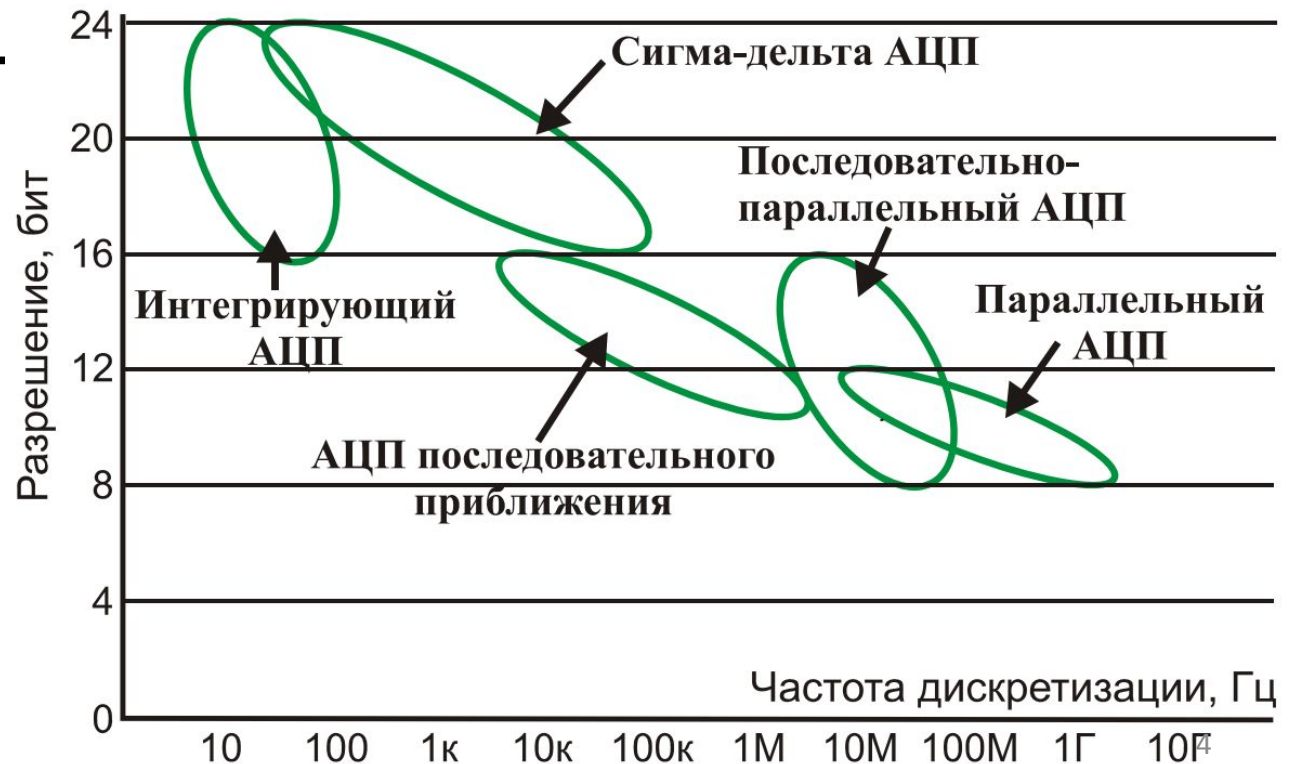


Частота дискретизации (или частота преобразования) – частота взятия отсчетов непрерывного во времени сигнала при его дискретизации

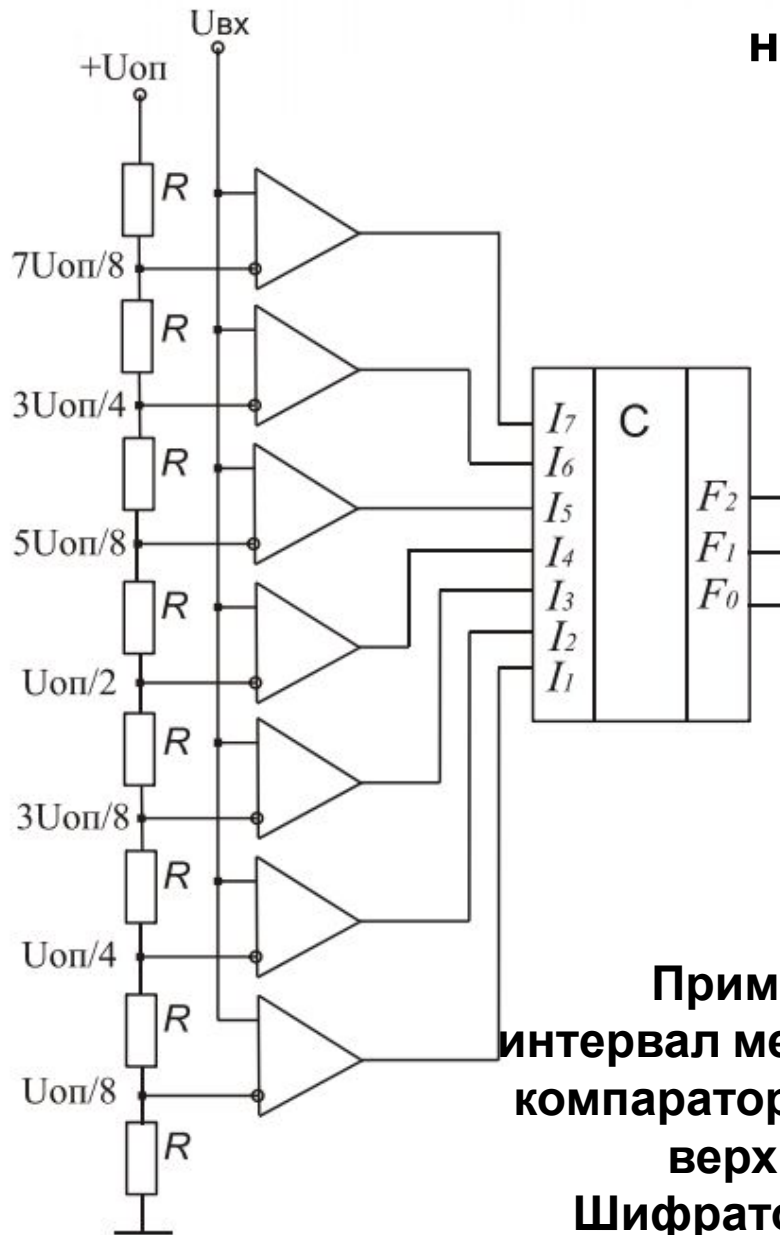
# Классификация

## АЦП

- АЦП параллельного преобразования (параллельные АЦП);
- АЦП последовательного приближения, (АЦП последовательного счета);
- Последовательно -параллельные АЦП;
- Интегрирующие АЦП;
- Сигма -дельта  $\Delta\Sigma$



# Параллельные



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 МЗР, и увеличиваются при переходе к каждому следующему компаратору с шагом, равным  $U_{оп}/2^n$ . 3-х разрядный АЦП имеет 23-1 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

# **Параллельные АЦП**

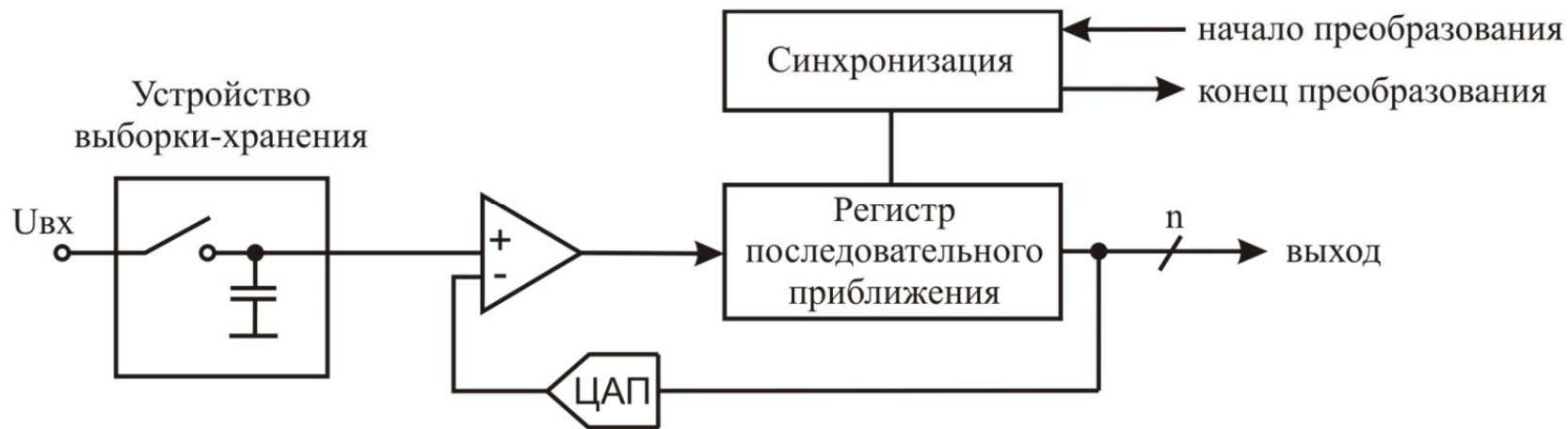
**Область применения параллельных АЦП – высокоскоростные устройства**

**Большинство высокоскоростных осциллографов и некоторые высокочастотные измерительные приборы используют параллельные АЦП из-за их высокой скорости преобразования, которая может достигать 5Г (5\*10<sup>9</sup>) 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.**

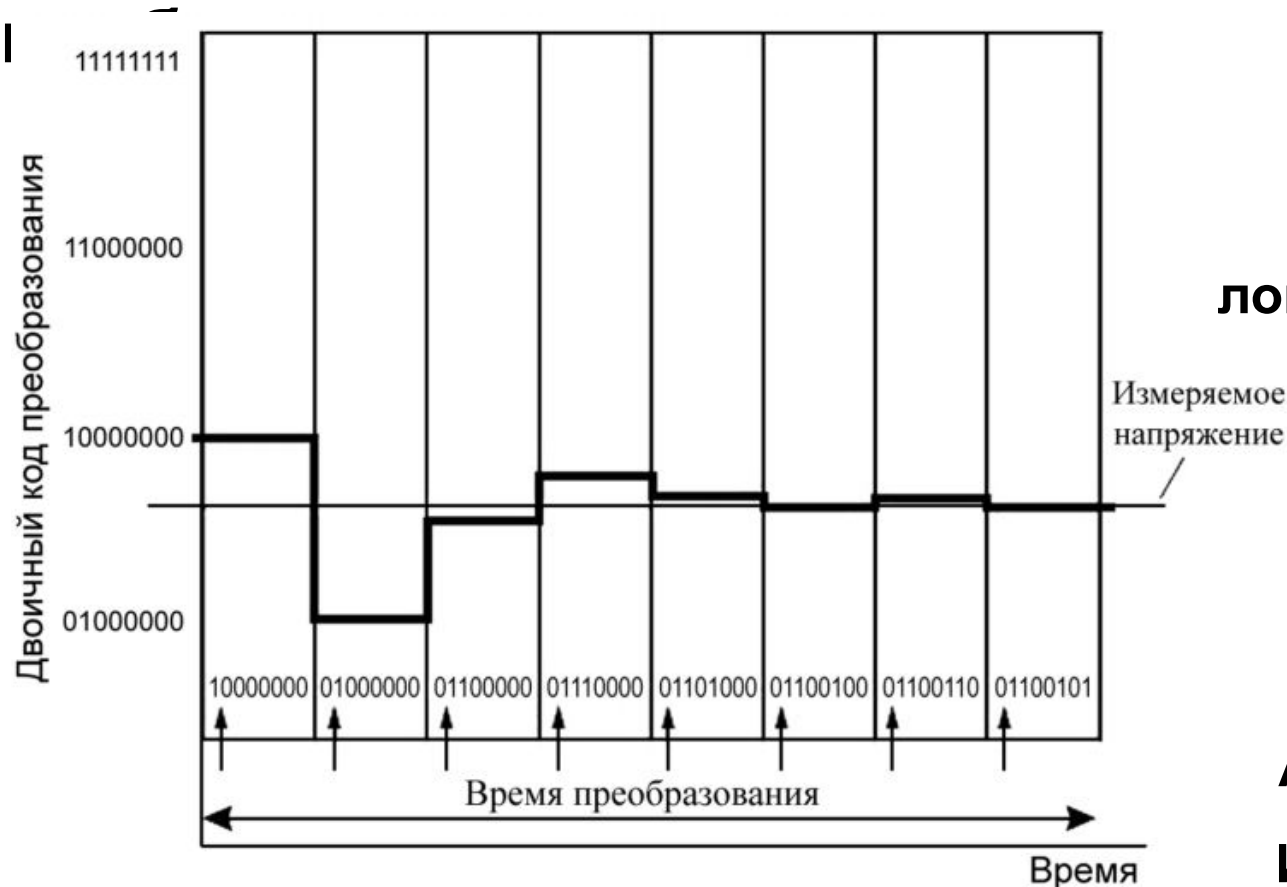
**Недостаток таких АЦП: из-за необходимости использовать большое количество компараторов параллельные АЦП потребляют значительную мощность, и их нецелесообразно использовать в**

# 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  $U_{вых}$ , значение которого равно либо  $\frac{1}{4}$ , либо  $\frac{3}{4}$  входного диапазона АЦП. Полученное напряжение  $U_{вых}$  ЦАП сравнивается с  $U_{вх}$ , результат

# АЦП последовательного



В начале цикла преобразования все выходы регистра устанавливаются в логический "0", старший (т.е. 8) в "1". На выходе внутреннего ЦАП формируется сигнал, значение которого равно половине входного диапазона АЦП (обычно  $0,5 \cdot U_{оп}$ ).

Измеряемое

напряжение меньше, значит в старший разряд записывается "0".

Затем в следующий разряд – 7 записывается «1»,  $U_{ЦАП} = 0,25 \cdot U_{оп}$ .

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».



# Цифро-аналоговые преобразователи

(ЦАП)

ИМС цифро-аналоговых преобразователей

классифицируются по следующим признакам:

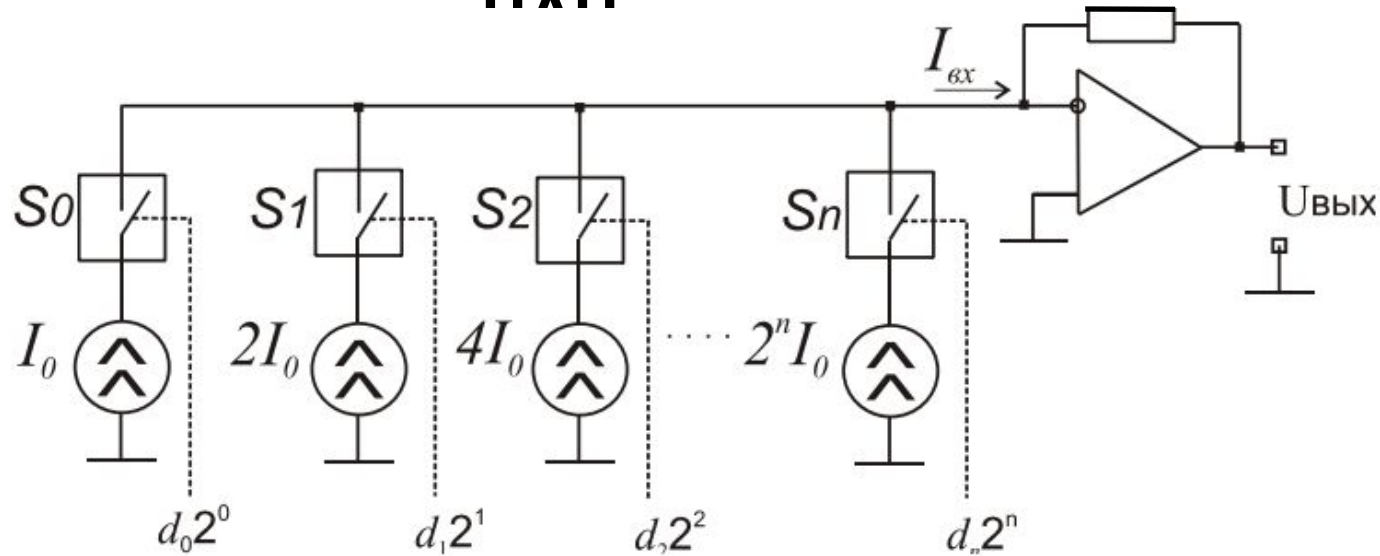
- По виду выходного сигнала: с токовым выходом и выходом в виде напряжения.
- По типу цифрового интерфейса: с последовательным вводом и с параллельным вводом входного кода.
- По числу ЦАП на кристалле: одноканальные и многоканальные.
- По быстродействию: умеренного и высокого быстродействия.

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  $k^9$

# Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)

## Структурная схема ЦАП



$$U_{\text{вых}} = -I_{\text{вх}} \cdot R_{\text{ос}}$$

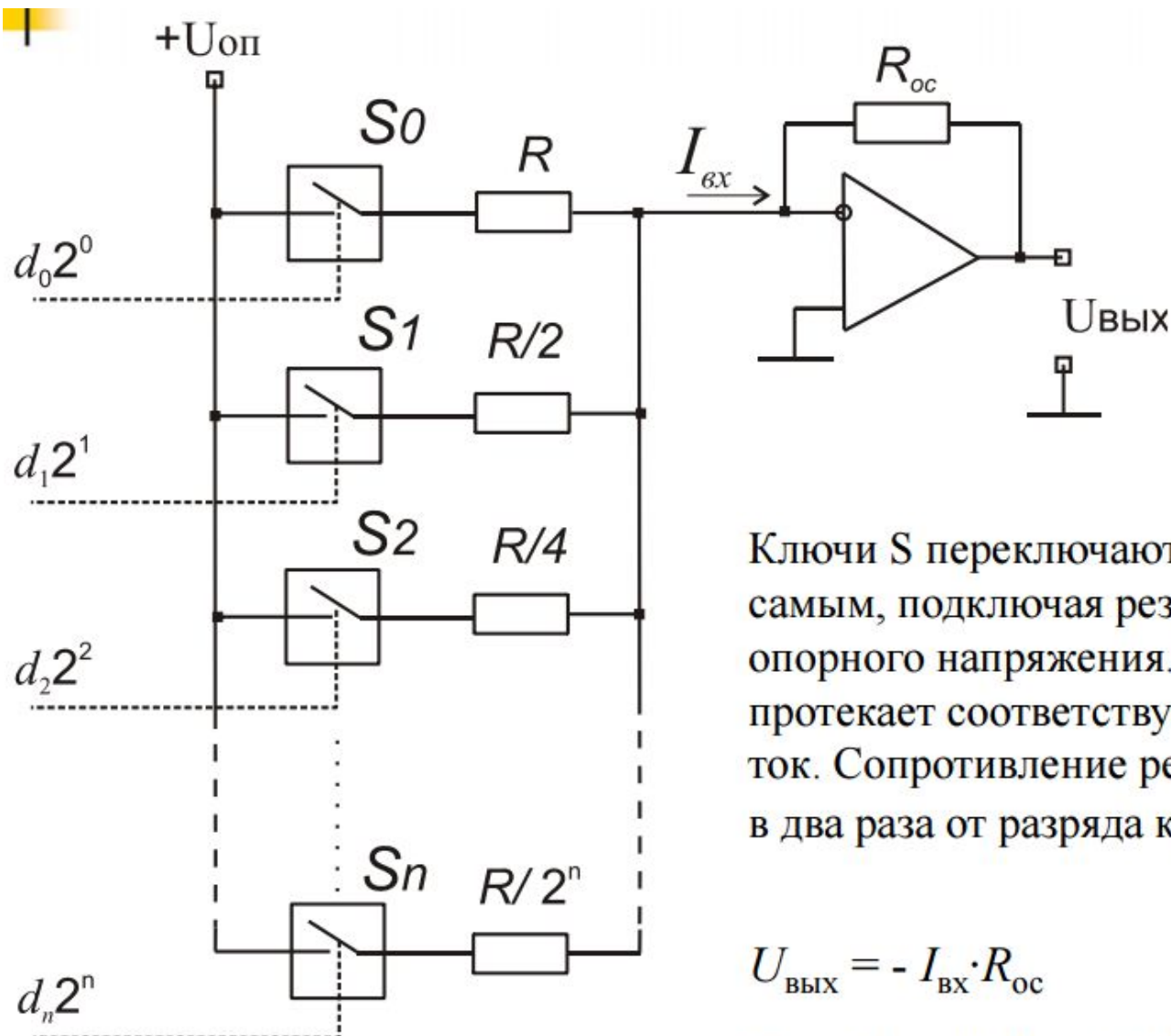
$$I_{\text{вх}} = d_0 \cdot I_0 + d_1 \cdot 2 \cdot I_0 + d_2 \cdot 4 \cdot I_0 + \dots + d_n \cdot 2^n \cdot I_0$$

$d_0, d_1, d_2 \dots d_n$  – 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*.

# Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) Параллельная схема суммирования



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.

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

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

# Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) Особенности параллельной схемы

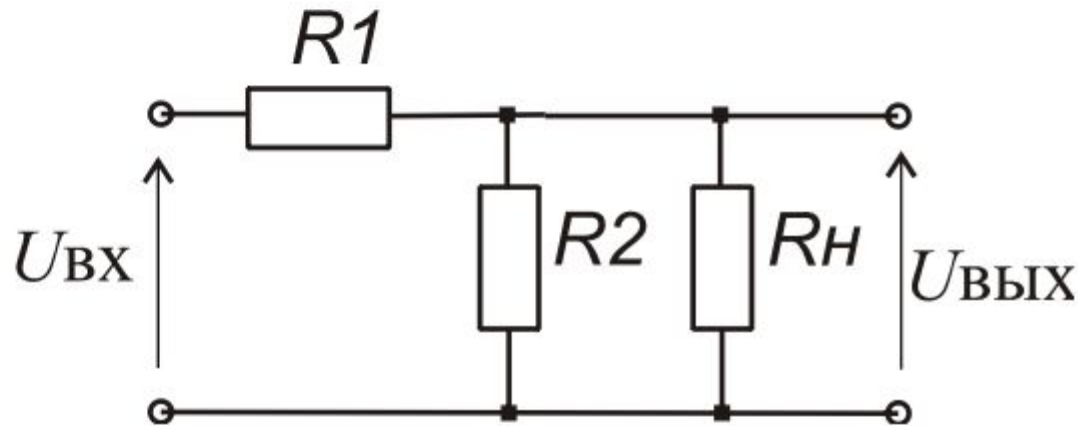
- При высокой разрядности сопротивления резисторов должны быть согласованы с высокой точностью.
- Особо жесткие требования предъявляются к резисторам старших разрядов, поскольку разброс тока в них не должен превышать тока младшего разряда. Разброс сопротивления в  $n$ -м разряде должен быть меньше, чем: 
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2^n}$$
- 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**

# Цифро-аналоговые преобразователи

## (ЦАП) Последовательная схема суммирования

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



$$R1 = R$$

$$R2 = Rn = 2R$$

$$R_{ВХ} = 2R =$$

$$Rn$$

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

# Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)

## Характеристики

### ЦАП

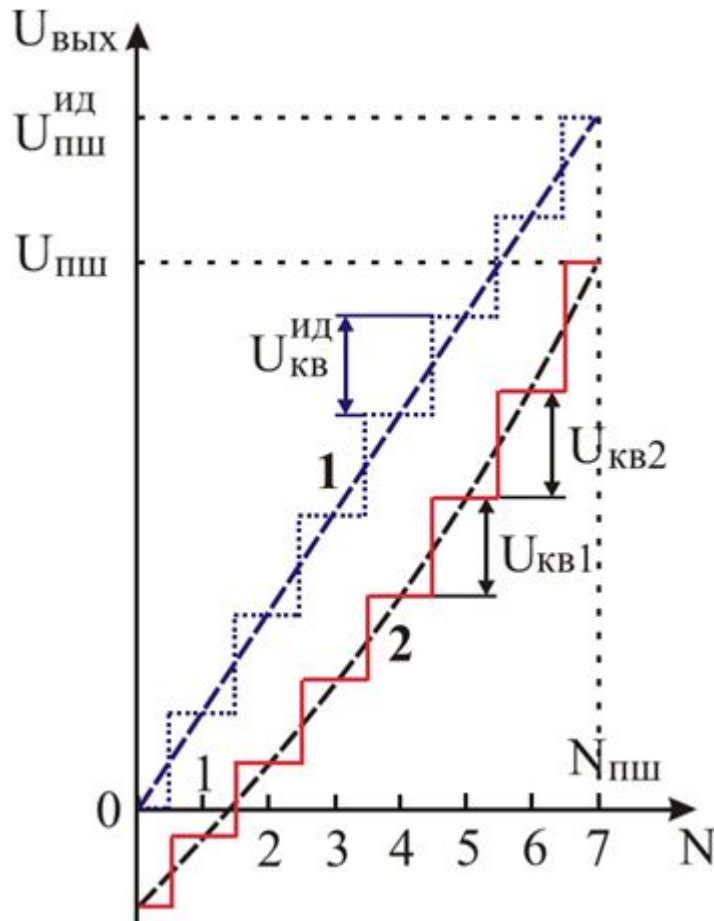
Характеристика преобразования – зависимость  $U_{\text{ВЫХ}}$  от входного кода  $N$  (часто входной код обозначают также

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 (1).

Реальная характеристика преобразования (2) может существенно отличаться от идеальной размерами и формой ступенек, а также расположением на



# Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)

## Параметры ЦАП

### *Статические параметры*

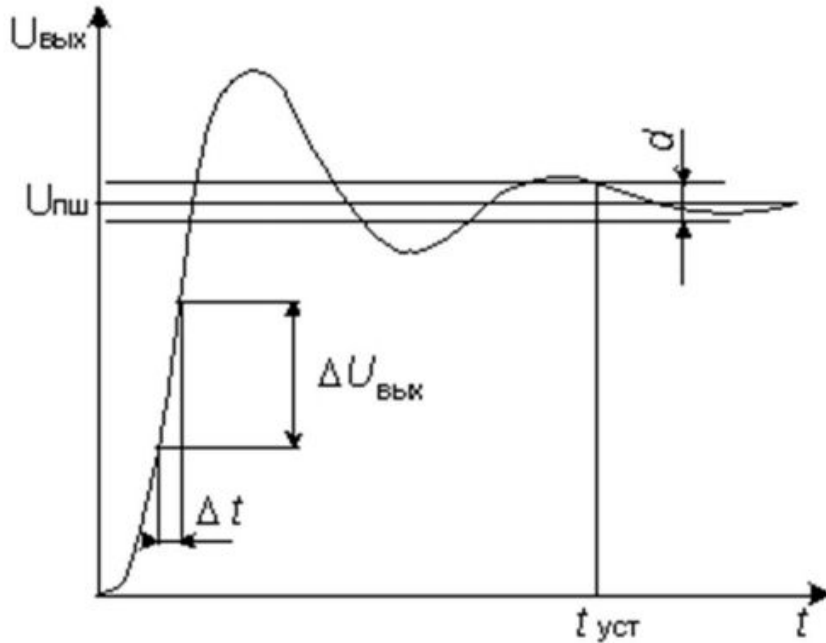
- Разрядность
- Разрешающая способность (относительная, абсолютная)
- Напряжение питания
- Уровни управляющего напряжения
- Величина опорного напряжения
- Максимальный выходной ток
- Погрешность преобразования:
  - погрешность полной шкалы ( абсолютная погрешность преобразования);
  - погрешность смещения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

# Цифро-аналоговые преобразователи

(ЦАП)

Динамические

Параметры  
ЦАП



Переходная характеристика ЦАП

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

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