

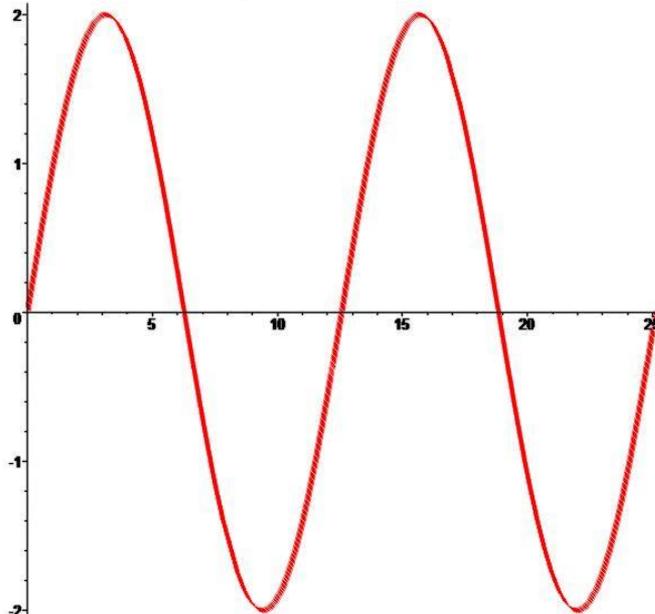
Тема 4.4. Цифроаналоговые (ЦАП) и аналого-цифровые преобразователи (АЦП) (2 час)

(дискретизация по времени, квантование по уровню и кодирование аналогового сигнала; классификация ЦАП и АЦП; резистивные матрицы: R - $2R$ и с весовыми коэффициентами; разрядность и разрешающая способность ЦАП; схема АЦП последовательного счёта)

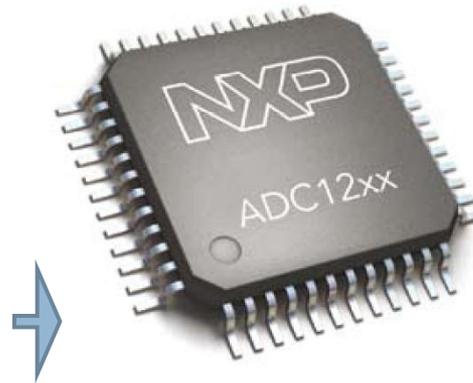
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ И ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Аналого-цифровой преобразователь — устройство для преобразования непрерывно изменяющейся во времени аналоговой физической величины в эквивалентные ей значения числовых кодов.

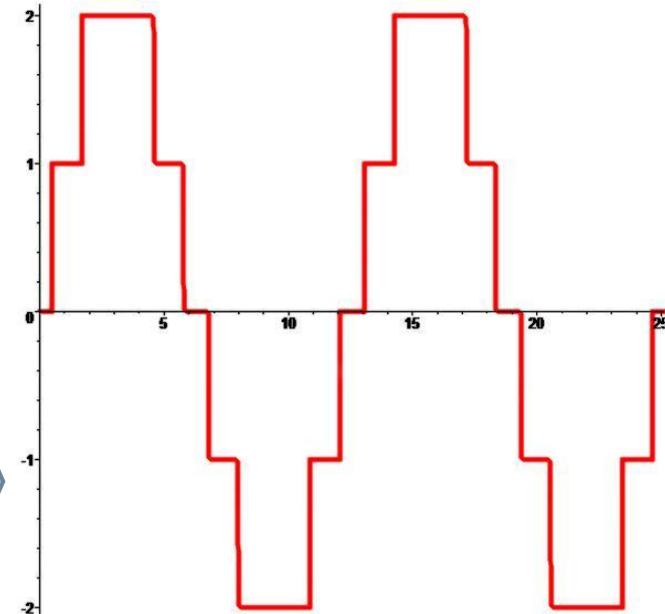
Задача Аналого-Цифрового Преобразователя (АЦП):
преобразование аналогового сигнала в цифровой



ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ



АЦП



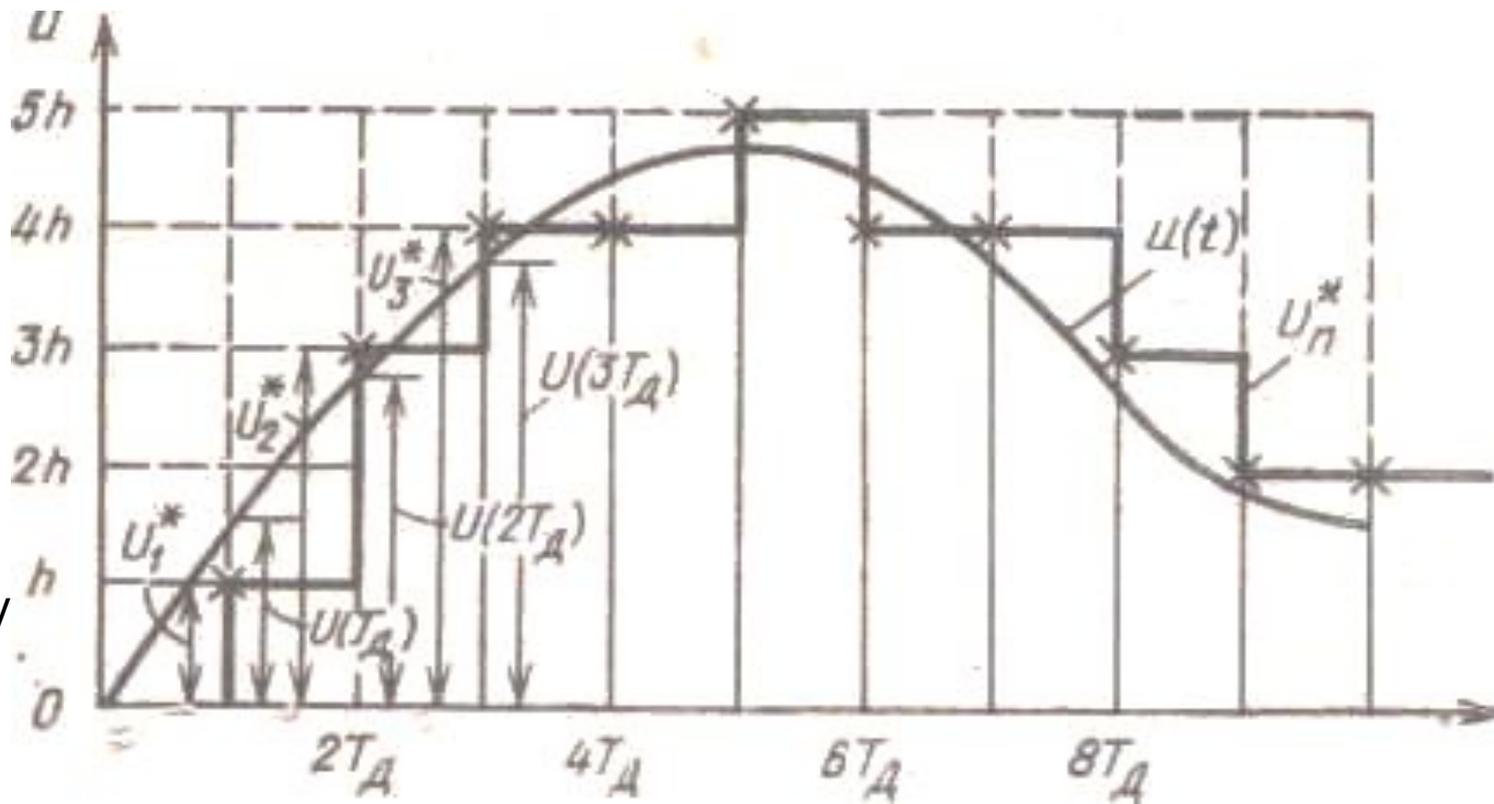
ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве аналоговой физической величины могут фигурировать различные параметры, например угол поворота, линейное перемещение, давление жидкости или газа и т. д. **В дальнейшем под этой величиной будем понимать напряжение либо ток, которые, при необходимости, можно легко преобразовать в другие физические величины.**

Процесс аналого-цифрового преобразования предполагает последовательное выполнение следующих операций:

- ДИСКРЕТИЗАЦИЯ СИГНАЛА по времени - выборка значений исходной аналоговой величины в некоторые наперёд заданные дискретные моменты времени;
- КВАНТОВАНИЕ - округление полученной в дискретные моменты времени последовательности значений исходной аналоговой величины до некоторых известных величин-уровней квантования;
- КОДИРОВАНИЕ — замена найденных квантованных значений некоторыми числовыми кодами.

Основным вопросом, с которым приходится сталкиваться при проектировании и использовании ЦАП и АЦП, является вопрос адекватности полученного в результате преобразования сигнала исходному физическому процессу, т. е. вопрос точности преобразования.



Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – устройство, предназначенное для преобразования аналоговых величин в их цифровой эквивалент в различных системах исчисления.

Входным сигналом АЦП в течение некоторого промежутка времени Δt является постоянное напряжение, равное отсчёту $u_{вх}(k\Delta t)$ входной аналоговой функции $u_{вх}$. За это время на выходе АЦП формируется цифровой (обычно двоичный) код

$$A_i(a_{n-1}a_{n-2}\dots a_1a_0)$$

соответствующий дискретному отсчёту напряжения $u_{вх}(k\Delta t)$. Количественная связь для любого момента времени определяется соотношением

$$A_i = u_{вх}(k\Delta t) / \Delta u \pm \delta_i$$

где Δu – шаг квантования входного аналогового напряжения $u_{вх}$; δ_i – погрешность преобразования напряжения $u_{вх}(k\Delta t)$ на данном шаге.

Постоянная величина T_n наз. периодом выборки (дискретизации), а сам процесс замены исходной аналоговой функции $F(t)$ некоторой дискретной функцией $U(nT_n)$ наз. дискретизацией сигнала во времени.

Процесс дискретизации аналогового сигнала длительностью t_{ex} выполняется в соответствии с теоремой Котельникова, определяющей необходимый шаг дискретизации

$$\Delta t \leq 1/(2f_m),$$

где f_m – максимальная частота спектра входного сигнала, и число шагов $M = t_{ex} / \Delta t$.

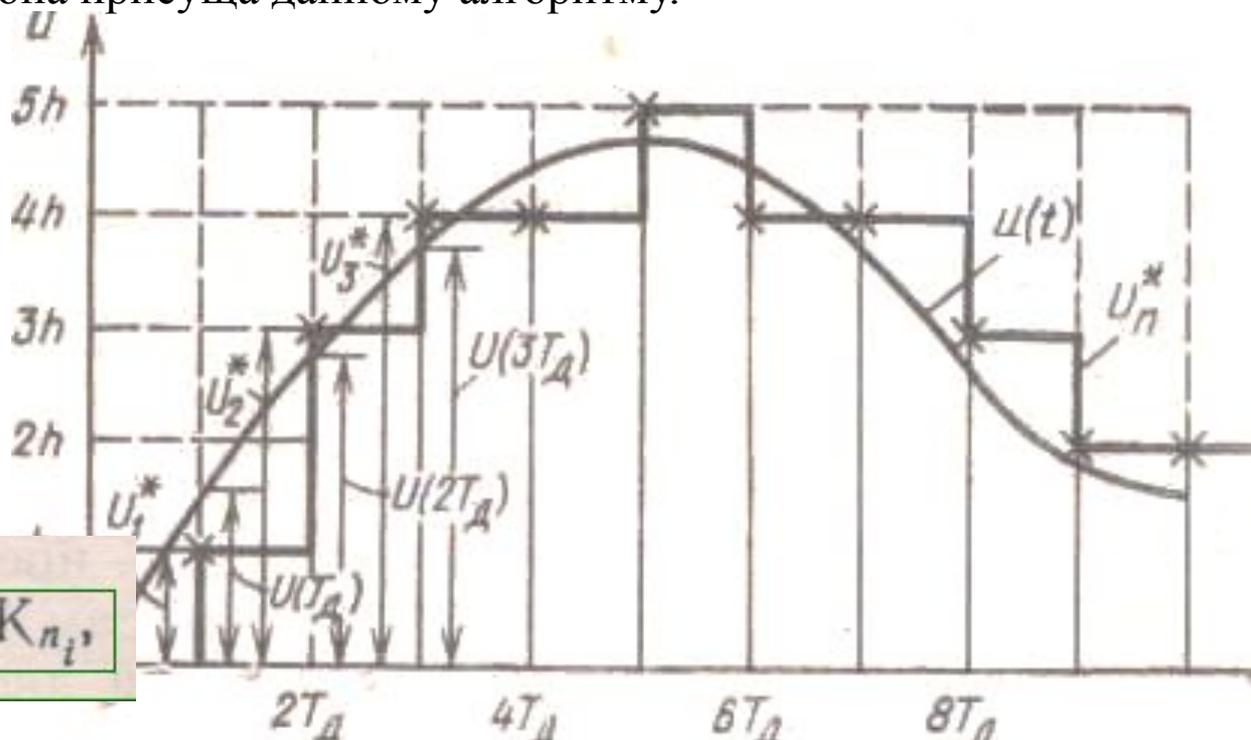
Теорема Котельникова

Если аналоговый сигнал $x(t)$ имеет ограниченный спектр, он может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчётам, взятым с частотой строго большей удвоенной максимальной частоты спектра f_c :

При соблюдении этого условия замена аналоговой функции на дискретную $F(nT_n)$ не сопряжена с искажением вида исходной зависимости, по $F(nT_n)$ можно однозначно восстановить исходный вид $u(t)$, погрешность преобразования на этапе дискретизации по времени отсутствует.

Процесс квантования по уровню дискретизированной функции $u_{\text{вх}}(k\Delta t)$ заключается в отображении бесконечного множества её значений на некоторое множество конечных значений $u_{\text{д}}(k)$, равное числу уровней квантования $N = u_{\text{вх.max}} / \Delta u$. Процесс квантования по уровню (округление каждого значения $U_{\text{вх}}(k\Delta t)$ до ближайшего уровня $U_{\text{д}}(k)$) приводит к возникновению ошибки (шума) квантования, максимальное значение которой $\pm 1/2 \Delta u$ определяется разрядностью используемого выходного кода. При увеличении разрядности выходного кода ошибка квантования может быть уменьшена до сколь угодно малой величины, но не может быть сведена к нулю выбором параметров устройства, так как она присуща данному алгоритму.

Процесс кодирования
заключается в замене
найденных
квантованных $N + 1$
значений входного
сигнала $U_{\text{д}}(k)$
некоторыми
цифровыми кодами.



$$K_{n_i} = \left[\frac{u(t)_{t=n_i T_d}}{h} \right] \pm \delta K_{n_i}$$

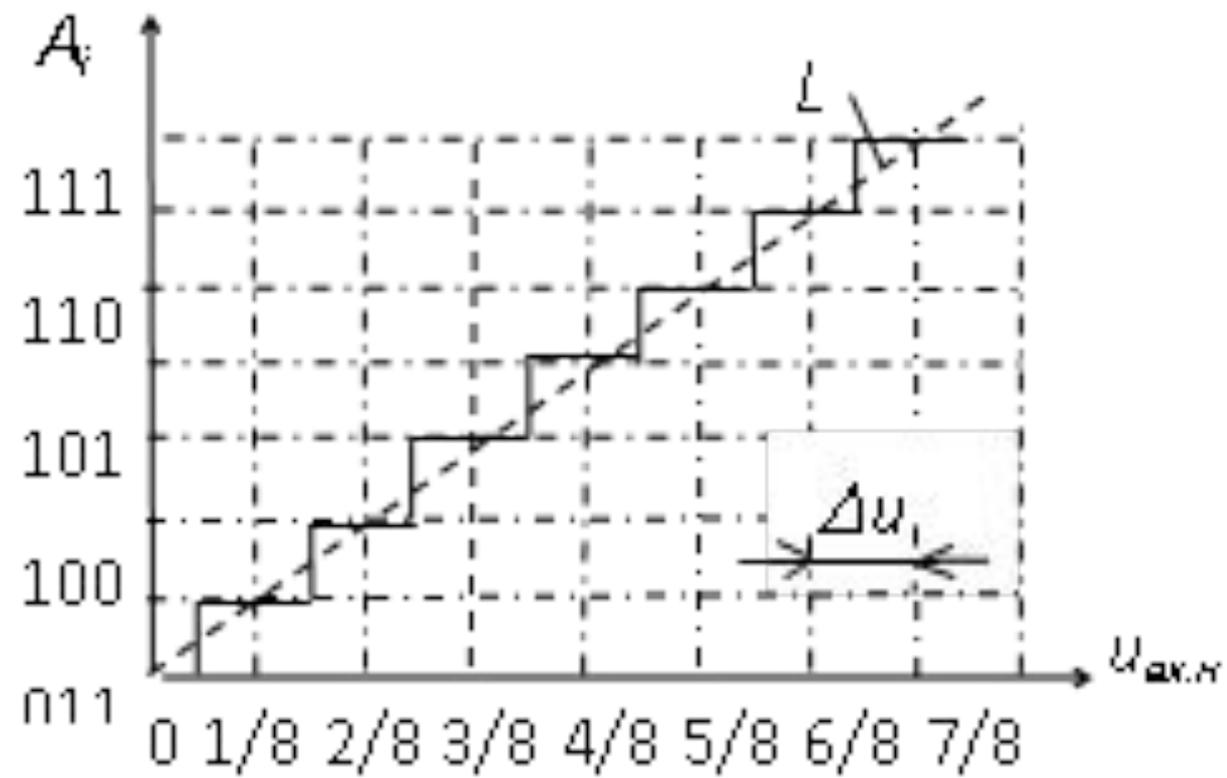
Кроме ошибки квантования, при оценке точности АЦП учитывают:

инструментальную погрешность (смещения нуля - смещение пунктирной прямой L влево или вправо от начала координат;

Апертурную погрешность (несоответствие значения входного сигнала $u_{вх}(k)$ преобразованному цифровому коду A_k).

Возникает, если входной сигнал в течение интервала дискретизации Δt изменяется более, чем на значение шага квантования Δu .

характеристика
идеального АЦП в
нормированных
единицах входного
напряжения $u_{вх.н} =$
 $u_{вх} / u_{вх.мах}$



Основные параметры АЦП:

– число разрядов выходного кода $n = 8, \dots, 16$, отображающего исходную аналоговую величину, которое может формироваться на выходе АЦП.

При использовании двоичного кода $n = \log_2(N + 1)$, где $N + 1$ – максимальное число кодовых комбинаций (уровней квантования) на выходе АЦП;

– диапазон изменения входного напряжения $U_{вх.max}$. Отметим, что АЦП может обрабатывать входную информацию в виде однополярного аналогового напряжения с пределами $0 \dots u_{вх.max}$ и двухполярного $\pm u_{вх.max} / 2$;

– абсолютная разрешающая способность $ZMP = \Delta u$ (значение младшего разряда) – среднее значение минимального изменения входного сигнала $u_{вх}$, обуславливающего увеличение или уменьшение выходного кода на единицу. Значение ZMP определяется разрядностью выходного кода и диапазоном входного напряжения;

– абсолютная погрешность δ_i преобразования в конечной точке шкалы – отклонение реального максимального значения входного сигнала $u_{вх.max}$ от максимального значения идеальной характеристики I АЦП (см. рис. 23.2 а). Обычно δ_i измеряется в ZMP ;

– максимальная частота преобразования (десятки и сотни кГц);

– время преобразования входного сигнала:

$$t_{пр.max} \leq (1/2)\Delta t.$$

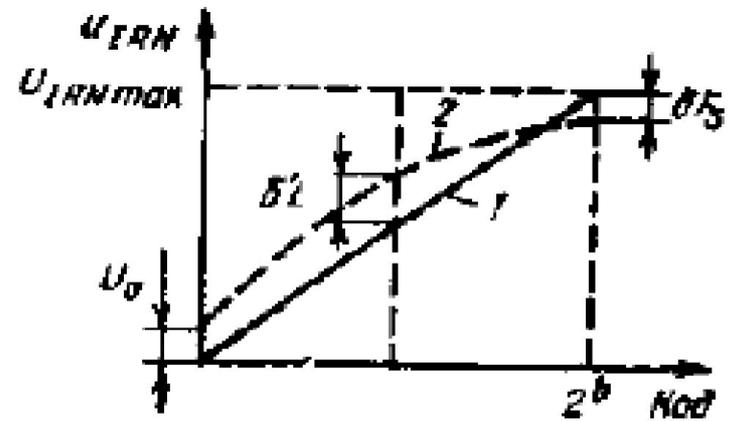


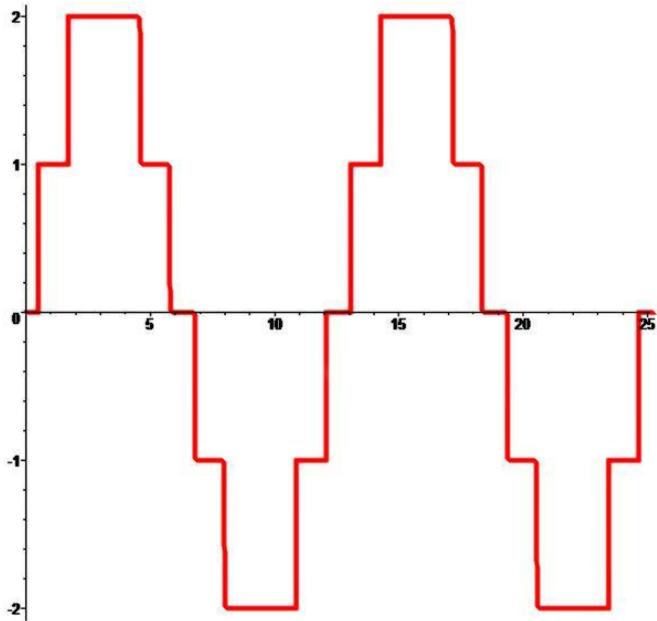
Рис. 23.2 Идеальная (1) и вариант реальной (2) характеристики преобразования АЦП

Области применения и основные требования к АЦП

Область применения	Число разрядов	Время преобразования, мкс	Максимальная частота входного сигнала, Гц
Радиолокация	6 .. 8	0,05	$2 \cdot 10^7$
Цифровое телевидение и видеотехника	8	0,05 .. 0,1	10^7
Управление производственными процессами	10 .. 12	10 .. 50	100
Высококачественные звукозапись и звуковоспроизведение	16 .. 20	50	$2 \cdot 10^4$
Телеметрия	14	10^4	100
Цифровые мультиметры	14 .. 18	10^4 .. $4 \cdot 10^4$	
Электрокардиография	14	$5 \cdot 10^3$	

Цифроаналоговый преобразователь предназначен для прямого преобразования входной цифровой величины в аналоговый эквивалент.

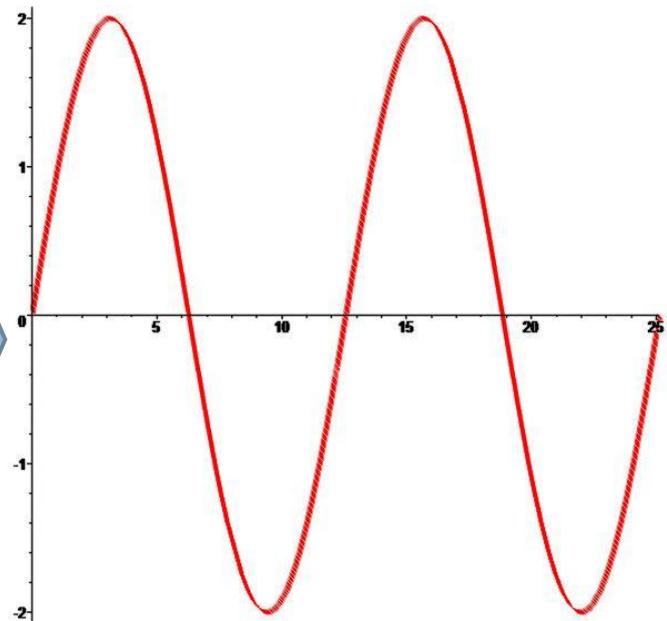
Задача Цифро-Аналогового Преобразователя (ЦАП):
преобразование цифрового (дискретного) сигнала
в аналоговый



входные данные



ЦАП



выходные данные

Процесс цифро-аналогового преобразования предполагает последовательное выполнение следующих операций:

- формирование в заданном диапазоне изменения выходного сигнала M его дискретных значений $U'_{\#}$, отличающихся на некоторое значение α , и постановка каждому сформированному уровню в соответствие некоторого кода $K_{\#}$;
- последовательное, с заданным временным интервалом $T_{\#}$ присвоение выходному сигналу значений выделенных уровней, соответствующих входной последовательности кодов $K_{\#}$.

$U_{ni} = \alpha K_{ni} + \delta U_{ni}$, где δU_{ni} — погрешность преобразования на i -м шаге.

Полученная функция, непрерывна во времени, остается дискретной по уровню из-за погрешности, обусловленной шумом квантования. Сам процесс цифро-аналогового преобразования не вносит собственных принципиальных погрешностей, а лишь материализует погрешности, полученные в АЦП. Реально возникающие при преобразовании погрешности носят чисто инструментальный характер.

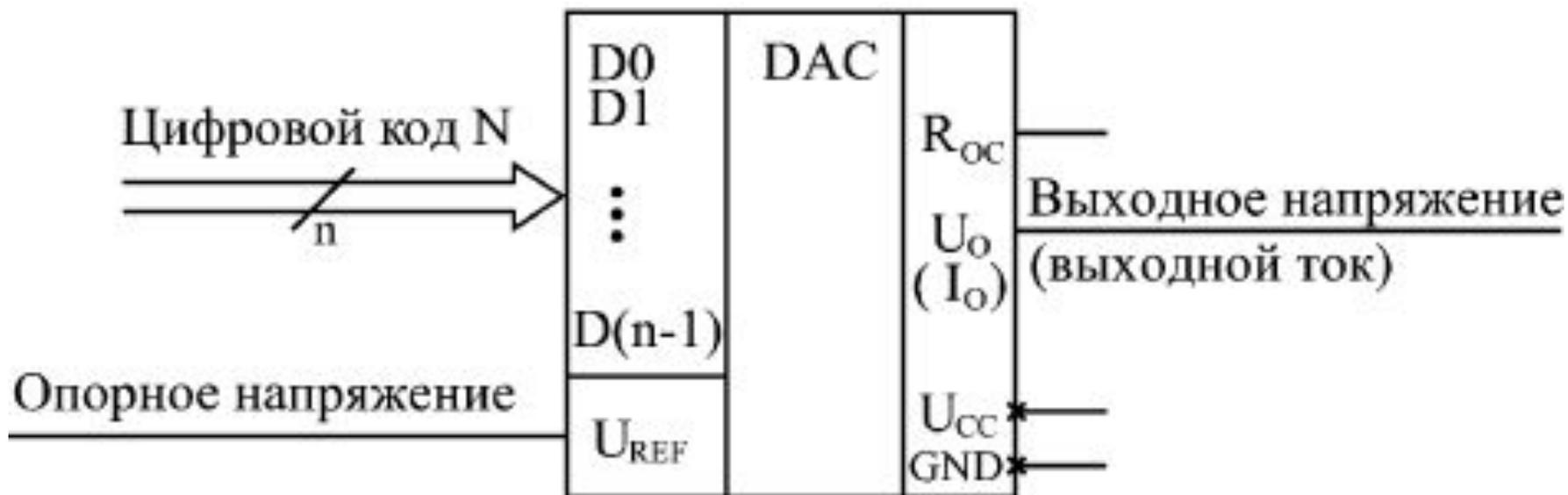
Погрешности, обусловленные самим алгоритмом работы, возникают только на этапе аналого-цифрового преобразования и их уменьшение требует уменьшения периода дискретизации T_n и шага квантования h .

Цифро-аналоговый преобразователь

Внутреннее устройство

Вход: опорное напряжение и цифровой код

Выход: аналоговый сигнал



Состав АЦП в отличие от ЦАП может изменяться в значительной степени в зависимости от выбранного метода преобразования и способа его реализации.

При распознавании сигнала в ЦАП наибольшее распространены:

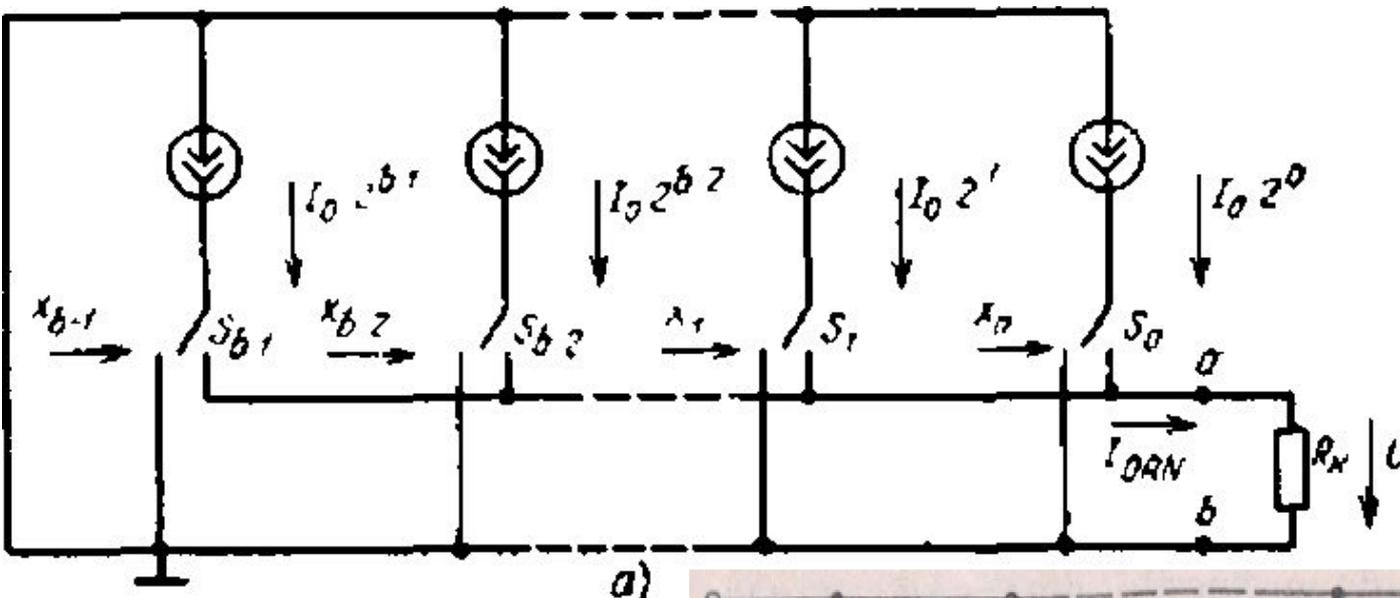
1. Метод последовательного счёта основан на уравнивании входной величины суммой одинаковых по величине эталонов (суммой шагов квантования). Момент уравнивания определяется с помощью одного компаратора, а количество эталонов, уравнивающих входную величину, подсчитывается с помощью счётчика.

2. Метод поразрядного кодирования (уравнивания) предусматривает наличие нескольких эталонов (часто реализованных в виде уравнивающего сдвигающего регистра), обычно пропорциональных по величине степеням числа 2, и сравнение этих эталонов с аналоговой величиной. Сравнение начинается с эталона старшего разряда. В зависимости от результата этого сравнения формируется значение старшего разряда выходного кода. Если эталон больше входной величины, то в старшем разряде ставится 0 и далее производится уравнивание входной величины следующим по значению эталоном. Если эталон равен или меньше входной величины, то в старшем разряде выходного кода ставится 1 и в дальнейшем производится уравнивание разности между входной величиной и первым эталоном.

Наибольшим быстродействием обладают преобразователи, построенные по методу считывания. **3. Метод считывания подразумевает наличие $2^n - 1$ эталонов при n -разрядном двоичном коде.** Входная аналоговая величина одновременно сравнивается со всеми эталонами. В результате преобразования получается параллельный код в виде логических сигналов на выходах $2^n - 1$ компараторов.

При построении ЦАП, реализующих метод суммирования нескольких различных эталонов, в качестве эталонов используют источники напряжения или тока. На практике наибольшее применение нашли схемы с эталонными источниками тока

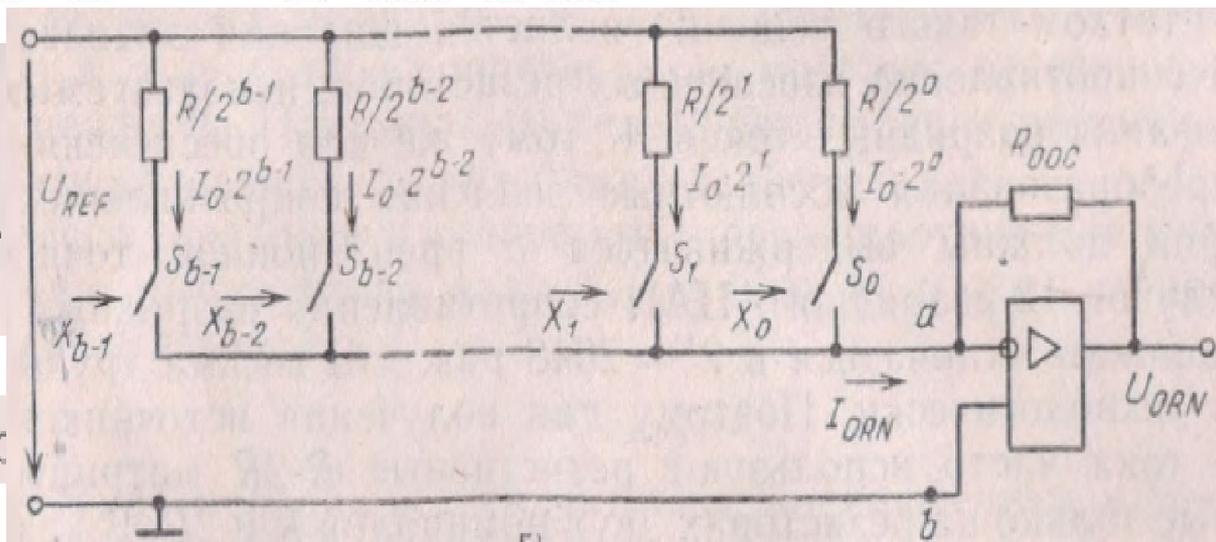
Структурная схема ЦАП с суммированием токов (а) и ее реализация с использованием матрицы взвешенных резисторов



ток резистора R_H

$$I_{ORN} = I_0 \sum_{i=0}^{b-1} 2^i X_i$$

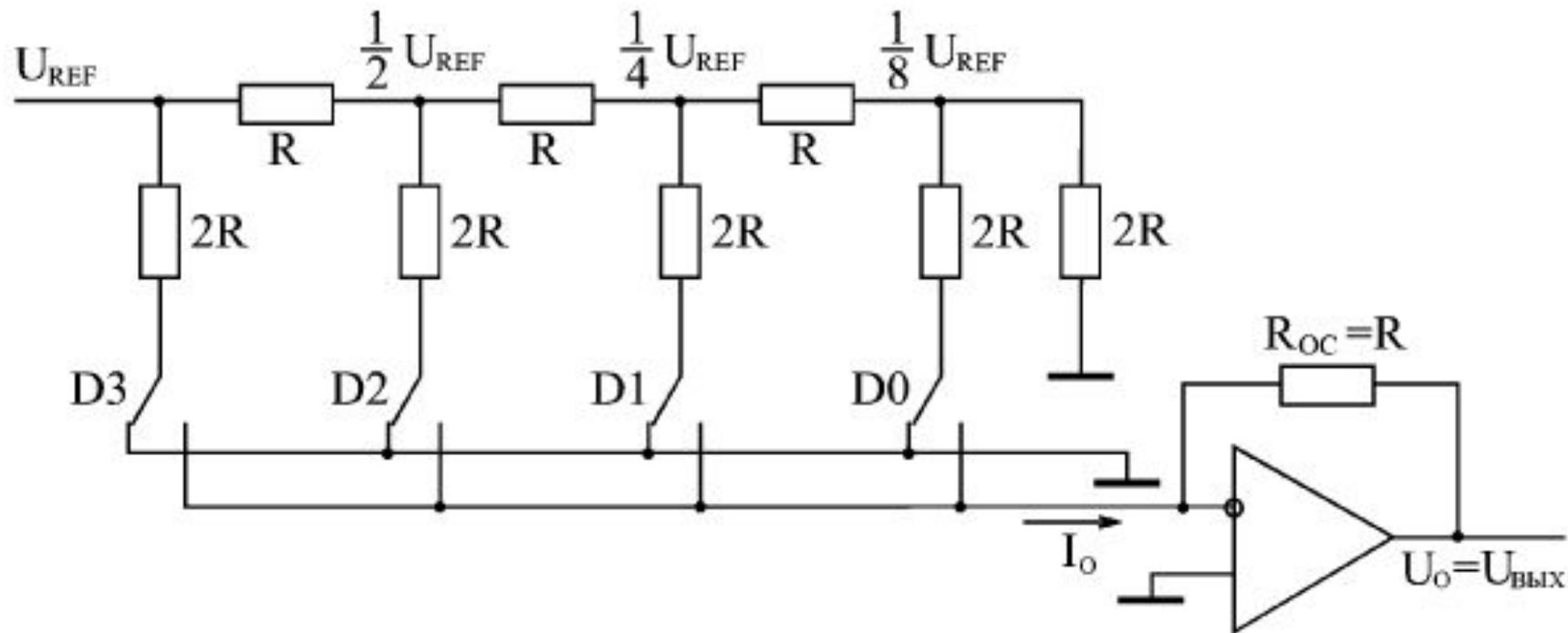
$$U_{ORN} = I_{ORN} R_{OOC}$$



Цифро-аналоговый

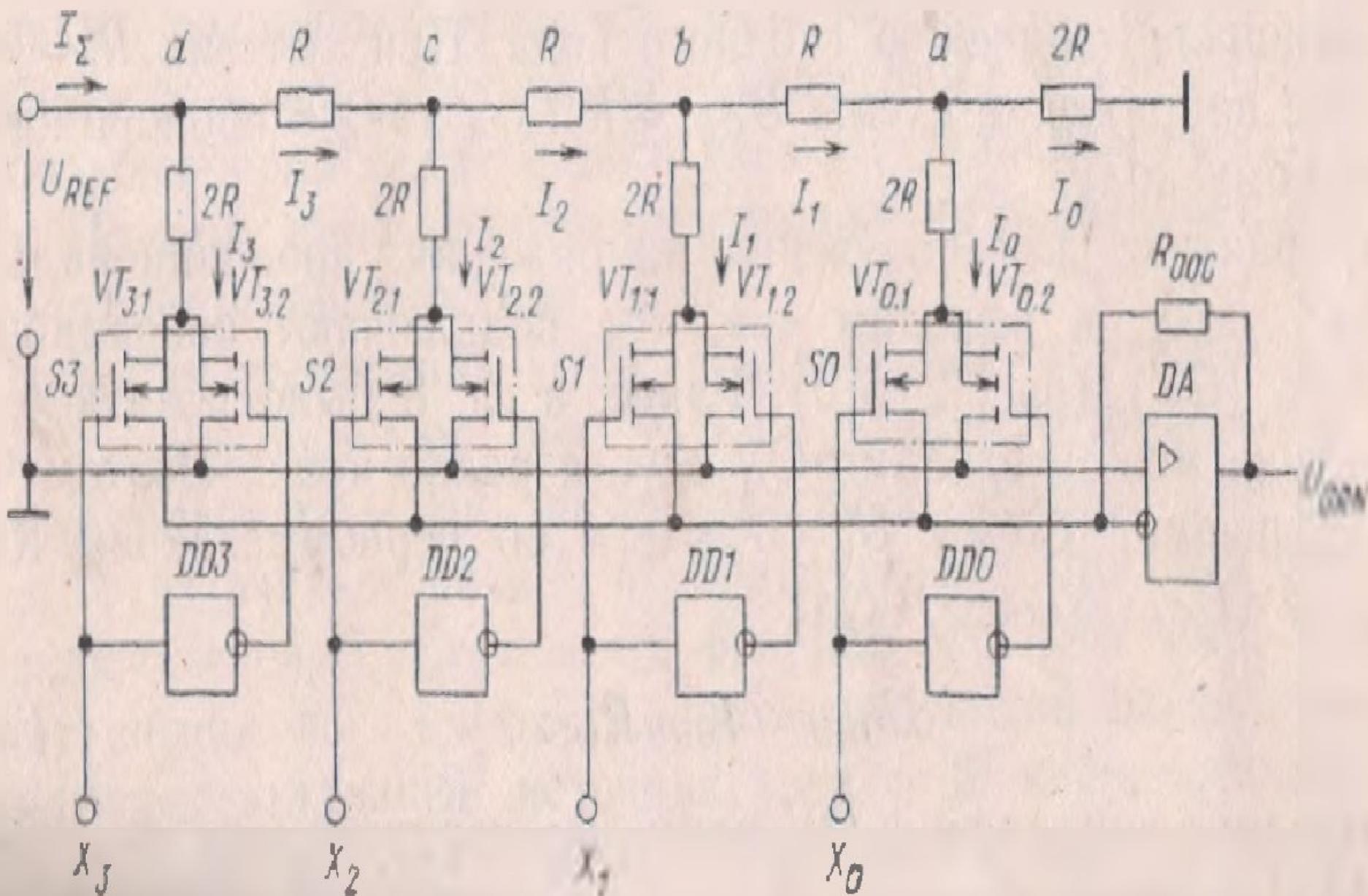
преобразователь

Структурная схема ЦАП с матрицей $R-2R$



Определим напряжение, которое может быть сформировано на выходе схемы рис. 23.6 при подаче на ее вход кода 1111. Из (23.6) в учетом (23.5) и (23.7) получаем

$$U_{ORN \max} = U_{REF} \left(\frac{1}{2^1} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^3} + \frac{1}{2^4} \right) = \frac{15}{16} U_{REF}.$$



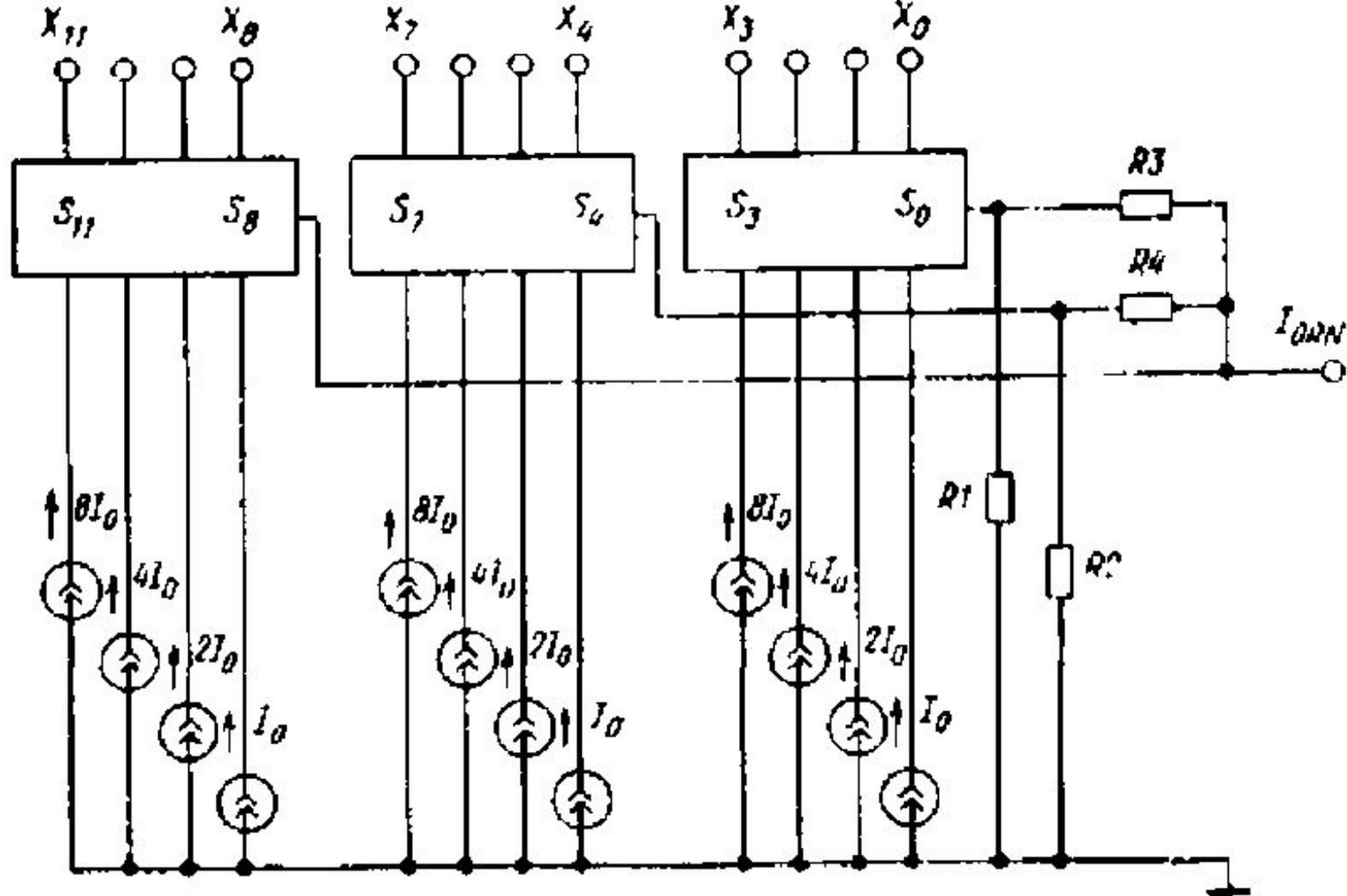
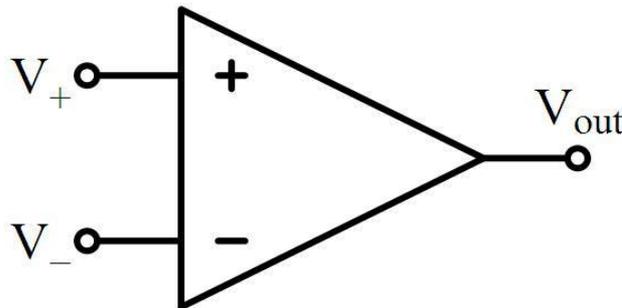


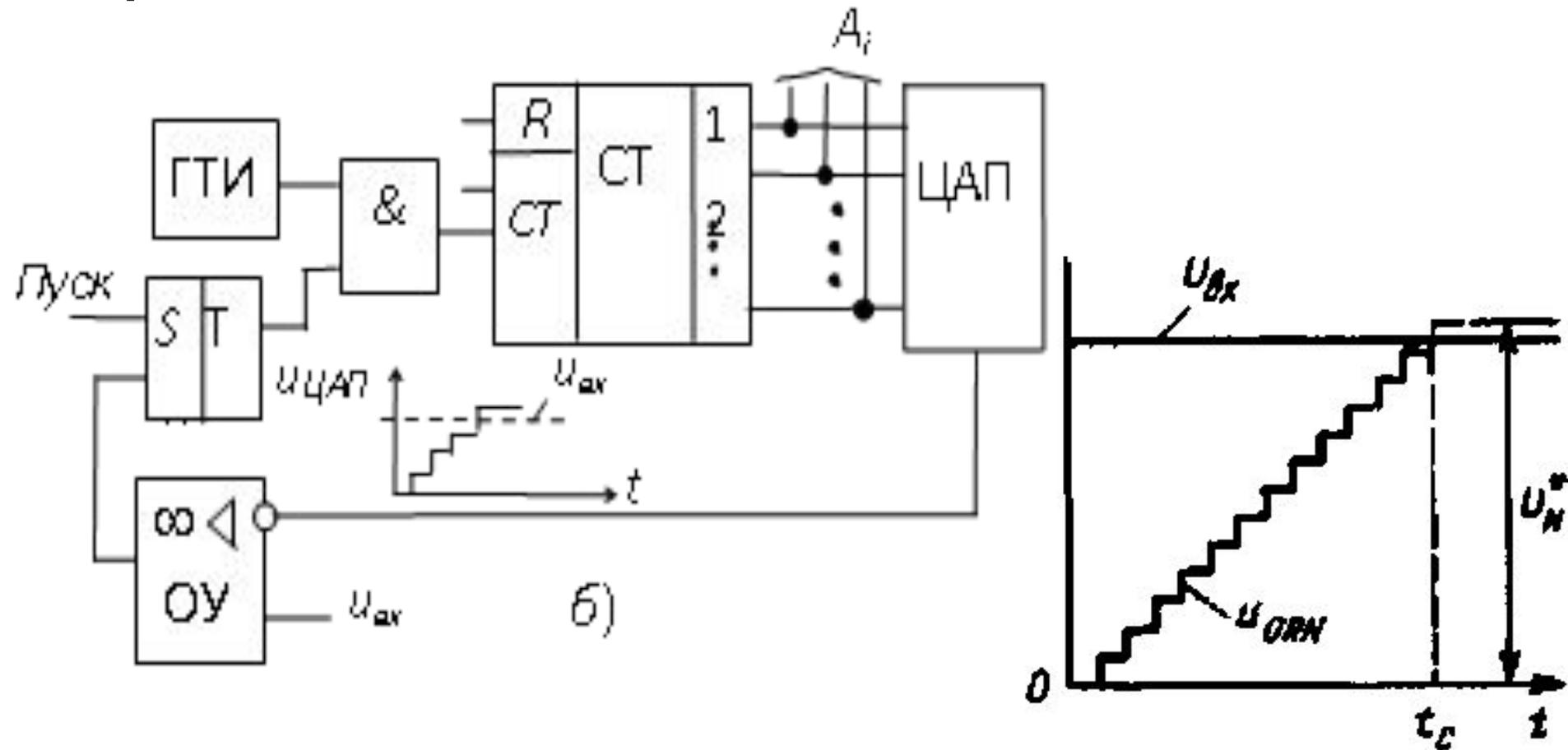
Рис. 237 Структурная схема ЦАП с весовым суммированием выходных сиг-

Компаратор

Компаратор (аналоговых сигналов) — электронная схема, принимающая на входы два аналоговых сигнала и выдающая логическую «1», если сигнал на прямом входе («+») больше чем на инверсном входе («-»), и логический «0», если сигнал на прямом входе меньше, чем на инверсном входе.



АЦП последовательного счета со счётчиком



По сигналу "Пуск" на вход обнуленного счётчика СТ начинают подаваться импульсы генератора тактовой частоты ГТИ. По мере поступления этих импульсов растёт входной код ЦАП и ступенчато повышается напряжение $u_{\text{цап}}$ на его выходе, причем уровень ступени соответствует шагу квантования Δu входного напряжения $u_{\text{вх}}$ АЦП.

Процесс преобразования заканчивается, когда напряжение $u_{\text{цап}}$ станет чуть больше входного напряжения $u_{\text{вх}}$ АЦП, поданного на вход ОУ, на котором собран компаратор. При этом работа счётчика прекращается, а на его выходе устанавливается код A_i , являющийся цифровым эквивалентом напряжения u

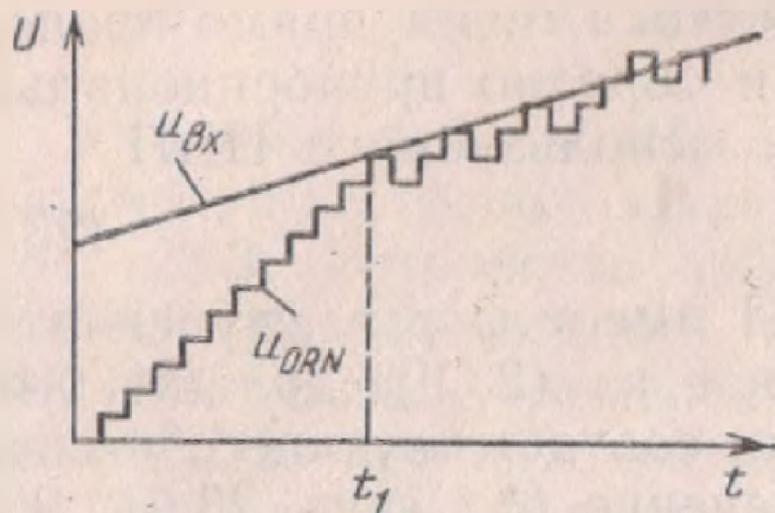
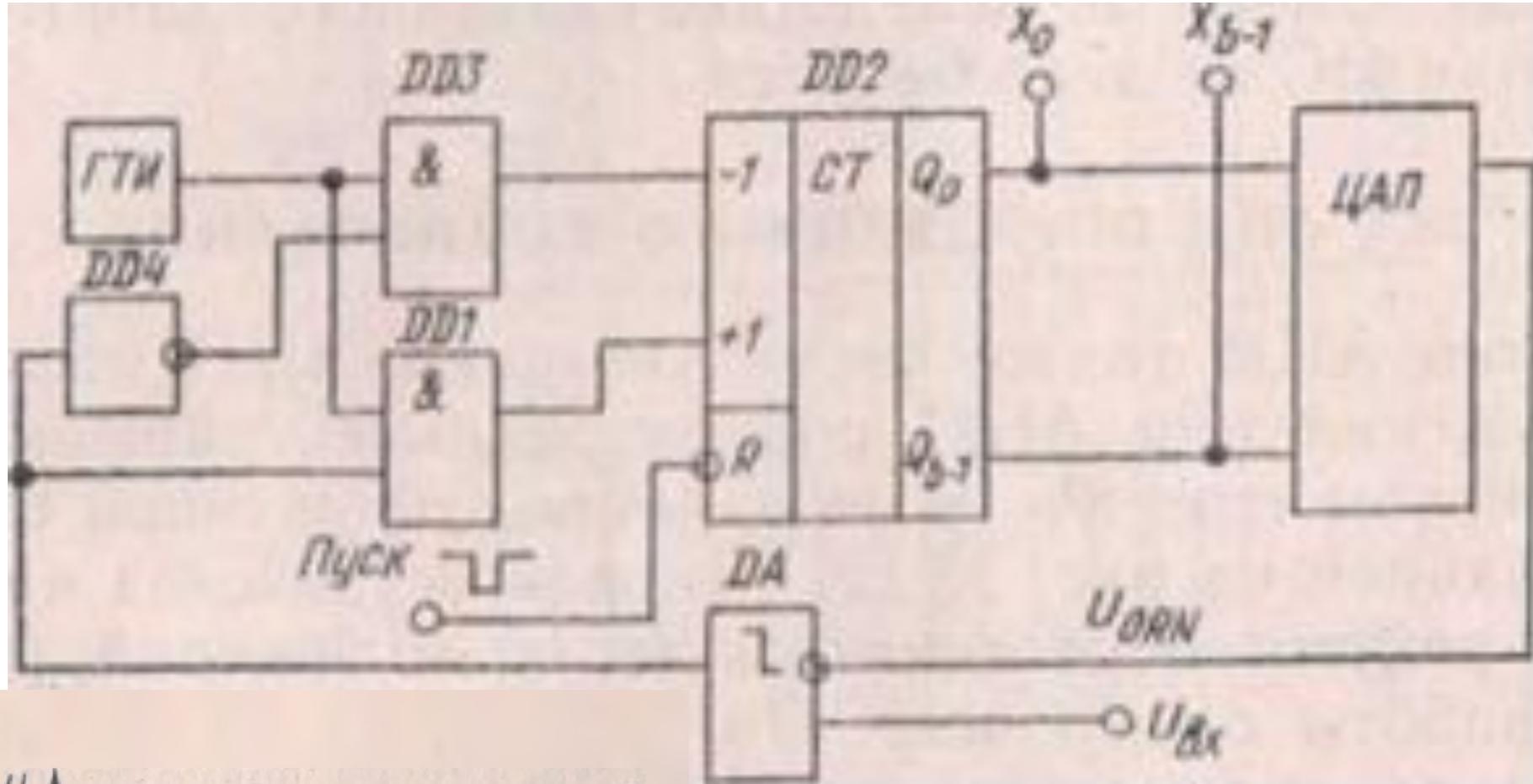


Рис. 23.11. Временная диаграмма входного напряжения компаратора нециклического АЦП

Цифро-аналоговый преобразователь

Характеристики

- **Разрядность** — количество различных уровней выходного сигнала, которые ЦАП может воспроизвести
- **Максимальная частота дискретизации** — максимальная частота, на которой ЦАП может работать
- **Монотонность** — свойство ЦАП увеличивать аналоговый выходной сигнал при увеличении входного кода
- **Динамический диапазон** — соотношение наибольшего и наименьшего сигналов, которые может воспроизвести ЦАП (выражается в децибелах)

Электрические характеристики ЦАП и АЦП подразделяют на

- статические (задают конечную точность преобразования),
- динамические (определяют быстродействие).

Статические характеристики преобразователей определяют вид характеристики преобразования, которая устанавливает соответствие между значениями аналоговой величины и цифрового кода. К ним относятся:

- *Число разрядов* кода, отображающего исходную аналоговую величину, формирующееся на выходе АЦП или подаваемое на вход ЦАП. При использовании двоичного кода под b понимают двоичный логарифм от максимального числа кодовых комбинаций (уровней квантования) на выходе АЦП или входе ЦАП.

- *Абсолютная разрешающая способность*—средние значения минимального изменения сигнала на выходе ЦАП, или минимального изменения входного сигнала АЦП, обусловленные увеличением или уменьшением его кода на единицу.

Значение абсолютной разрешающей способности является мерой измерения всех основных статических характеристик данного класса устройств и часто обозначается как ЕМР (единица младшего разряда), или просто МР (младший разряд).

Абсолютная погрешность преобразования в конечной точке шкалы - отклонение реальных максимальных значений входного для АЦП (U_{ifin}) и выходного для ЦАП аналоговых сигналов от значений, соответствующих конечной точке идеальной характеристики преобразования. Применительно к АЦП наличие означает, что максимальный выходной код будет сформирован на выходе устройства при входном сигнале $= r_{\text{max}} - bF_s$. По аналогии для ЦАП можно сказать, что при подаче на вход максимального кода его выходное напряжение b будет отличаться от $U_{04Nmi\%}$ на величину bF_s . Обычно измеряется в ЕМР. В технической литературе bF_s иногда называют мультипликативной погрешностью.

Напряжение смещения нуля U_0 — для АЦП это напряжение, которое необходимо приложить к его входу для получения нулевого выходного кода. Для ЦАП — это напряжение, присутствующее на его выходе (т/выхо) при подаче на вход нулевого кода. Величина обычно выражается в ЕМР.

Нелинейность (δL) — отклонение действительной характеристики преобразования от оговоренной линейной, т. е. это разность реального напряжения, соответствующего выбранному значению кода и напряжения, которое должно соответствовать этому коду в случае идеальной характеристики преобразования устройства, (рис. 23.2). Для ЦАП это напряжение измеряется относительно центров ступеней указанных характеристик (рис. 123 Д). В качестве оговоренной линейной характеристики используется либо прямая, проведенная через точки 0, либо прямая, обеспечивающая минимизацию bL , например, среднеквадратическое отклонение всех точек которой от реальной характеристики минимально. Величину bL измеряют в ЕМР ($bL = \delta'L/h$) или процентах ($\delta L = 100b'L/U_{\text{mix}}$), где $b'L$ — абсолютное значение нелинейности. В справочной литературе обычно задается максимально возможная величина δL .

Шаг квантования $b'L_q$ от его среднего значения (ft) (рис. 23.3). Величина b'_a измеряется либо в ЕМР [$\delta L = (b'L_q - L)/A$], либо в процентах $(b'L_q - k) \cdot 100/U_{\text{mix}}$.

Величина дифференциальной нелинейности однозначно связана с понятием монотонности характеристик ЦАП и АЦП. Если $|b'_d| > 1$ ЕМР, то приращение выходного сигнала в данной точке характеристики может быть как положительным, так и отрицательным (рис. 23.3). В последнем случае характеристика преобразования перестает быть монотонной.

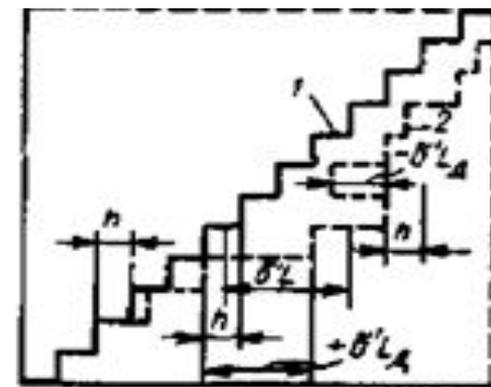
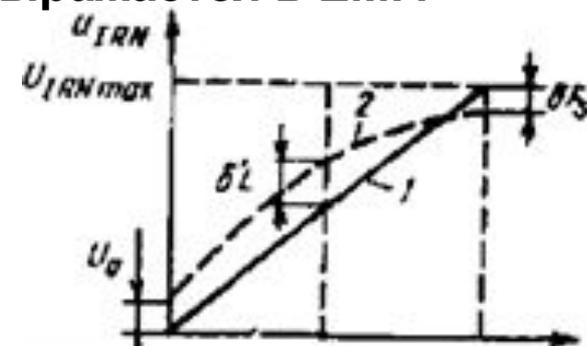
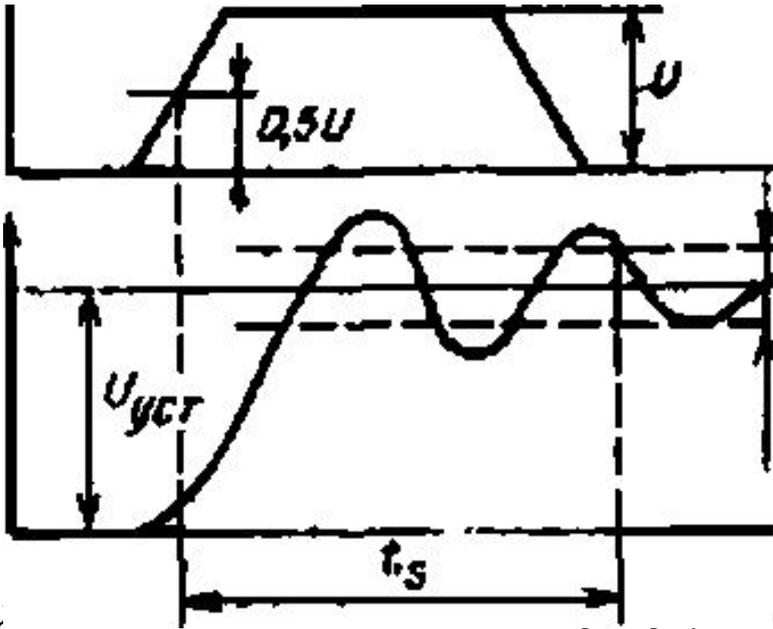


Рис 23 2 Идеальная (1) и вариант реальной (2) характеристики преобразования АЦП

Рис 23 3 Идеальная (1) и вариант реальной (2) характеристики передачи ЦАП



Определение времени преобразования ЦАП

сующими параметрами:

максимальная частота преобразования (f_{mjx}) — наибольшая частота дискретизации, при которой заданные параметры соответствуют установленным нормам;

время установления выходного сигнала (t_s) — интервал от момента заданного изменения кода на входе ЦАП до момента, при котором выходной аналоговый сигнал окончательно войдет в зону заданной ширины, симметрично расположенную относительно установившегося значения. Обычно ширина этой зоны задается равной $1EMR$ (рис. 23.4). Отсчет времени t_s ведется от момента достижения входным сигналом значения половины логического перепада. Очевидно, что, в силу выражения (23.3), значение t_s связано с τ_{max} условием $\tau_{max} < t_s / 2$. Аналогичный параметр для АЦП называют временем преобразования (Гс).

Существует большое число классификационных признаков ЦАП и АЦП.

ЦАП разделяют на два класса:

- устройства, реализующие метод многократного суммирования одного эталона;
- устройства, реализующие метод суммирования нескольких различных эталонов.

Цифро-аналоговые преобразователи первого класса используют при работе единственный эталон, число повторений (суммирований) которого определяется значением входного единичного кода. Этот код подается на вход ЦАП в последовательной форме.

Цифро-аналоговые преобразователи второго класса имеют число эталонов, равное разрядности входного кода. Причем значения этих эталонов пропорциональны величинам весовых коэффициентов используемого кода. Входной код подается на вход таких ЦАП в параллельной форме.

Следует отметить, что в настоящее время используются только ЦАП второго класса.

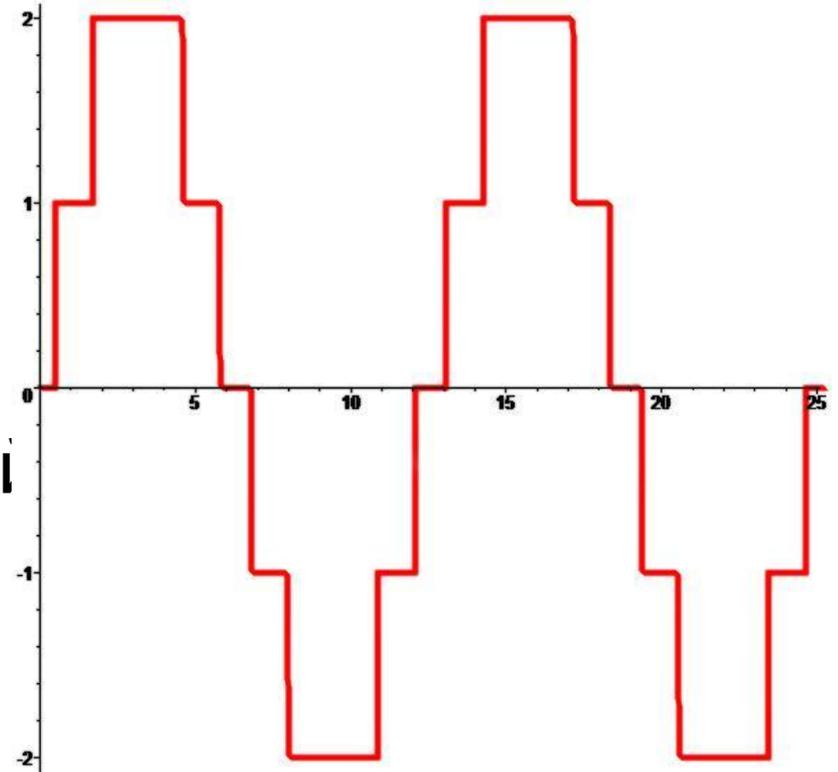
Интегральные схемы ЦАП могут выполняться как функционально завершенными, т. е. не требующими для своей работы дополнительных элементов, так и функционально незавершенными. В последнем случае в качестве внешних элементов, как правило, применяют источник эталонного напряжения, операционный усилитель, регистры и т. д.

Работа с внешним источником эталонного напряжения позволяет разделить все ЦАП на две группы: *умножающие* — работающие с изменяющимся во времени источником эталонного сигнала, и *неумножающие* — работающие с эталонным источником, величина которого в течение всего времени работы устройства остается постоянной.

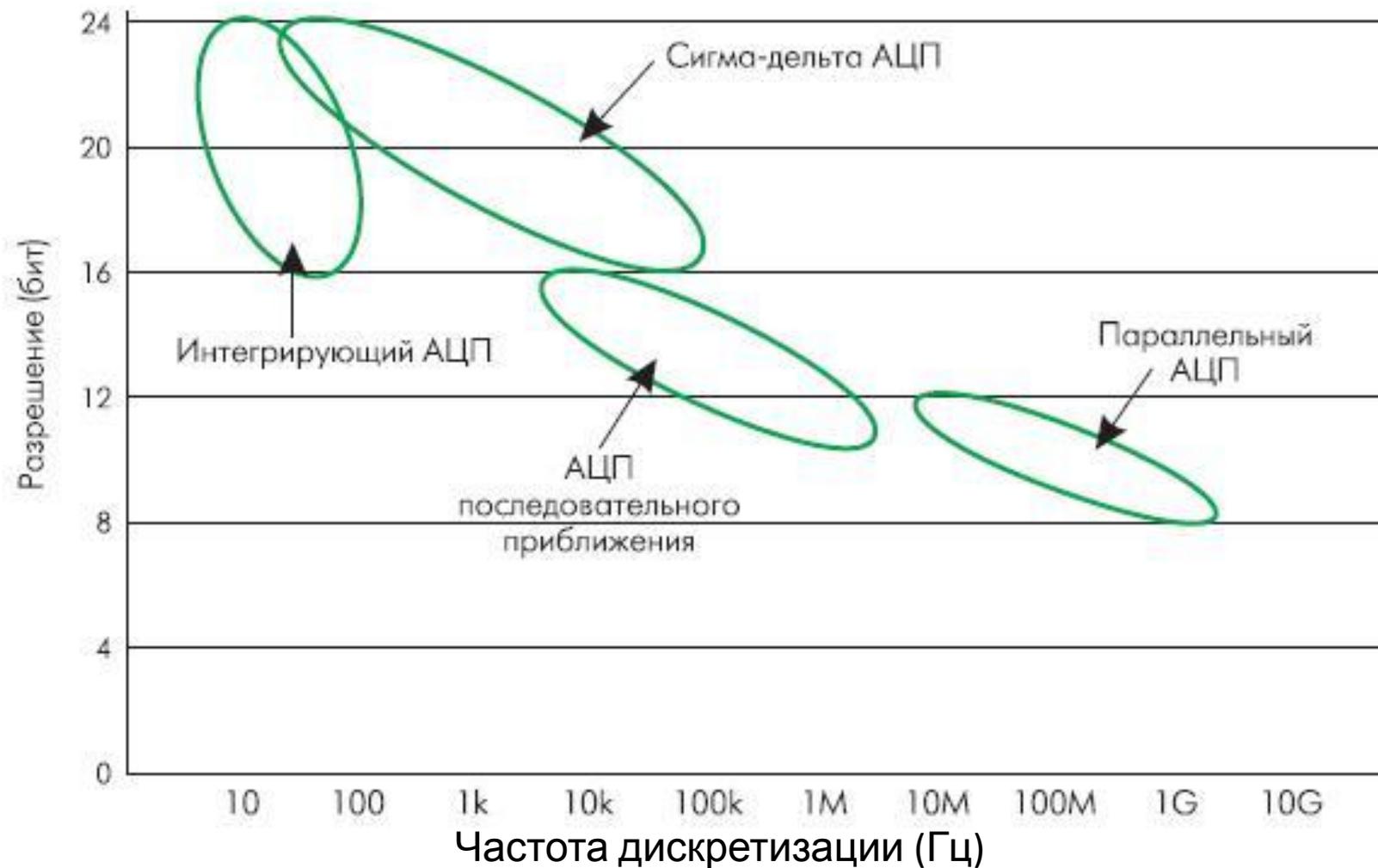
АЦП

Характеристики:

- диапазон входных значений (Вольты)
- разрядность (уровни квантования)
- двоичный или троичный
- частота дискретизации (Герцы)
- линейный или нелинейный



Классификация АЦП



Параллельные АЦП

- Высокая скорость преобразования (5 – 20 ГГц)
- Большая потребляемая мощность (обуславливается большим числом компараторов)

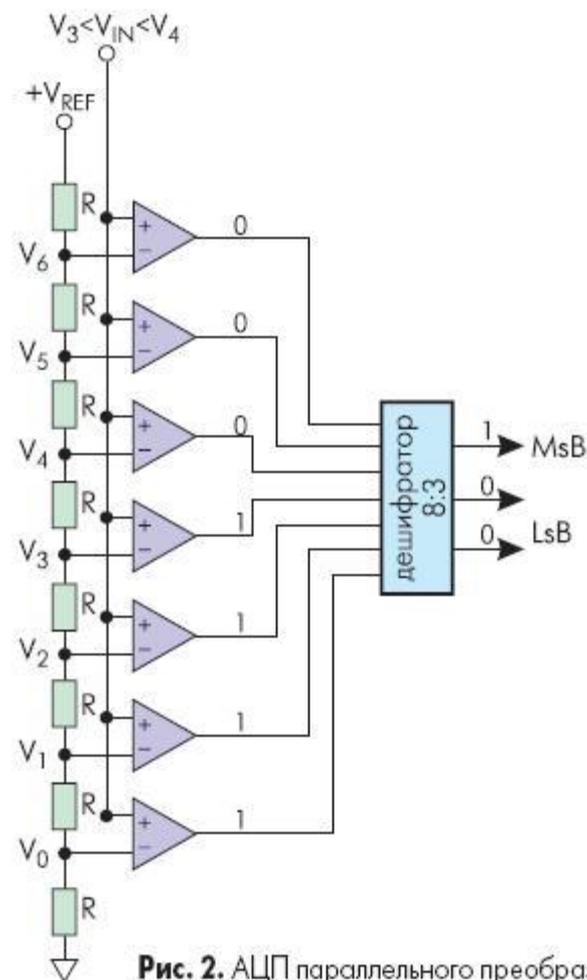


Рис. 2. АЦП параллельного преобразования

АЦП последовательного приближения

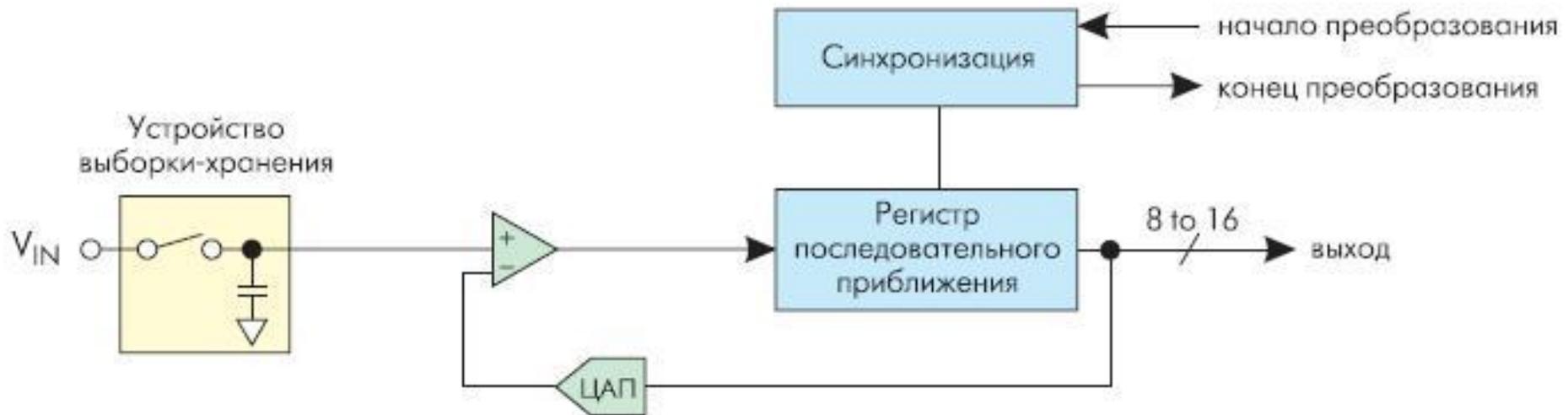


Рис. 3. АЦП последовательного приближения

- Частота дискретизации 100КГц – 1МГц
- Низкое энергопотребление
- Точность – до 16 разрядов

АЦП последовательного приближения

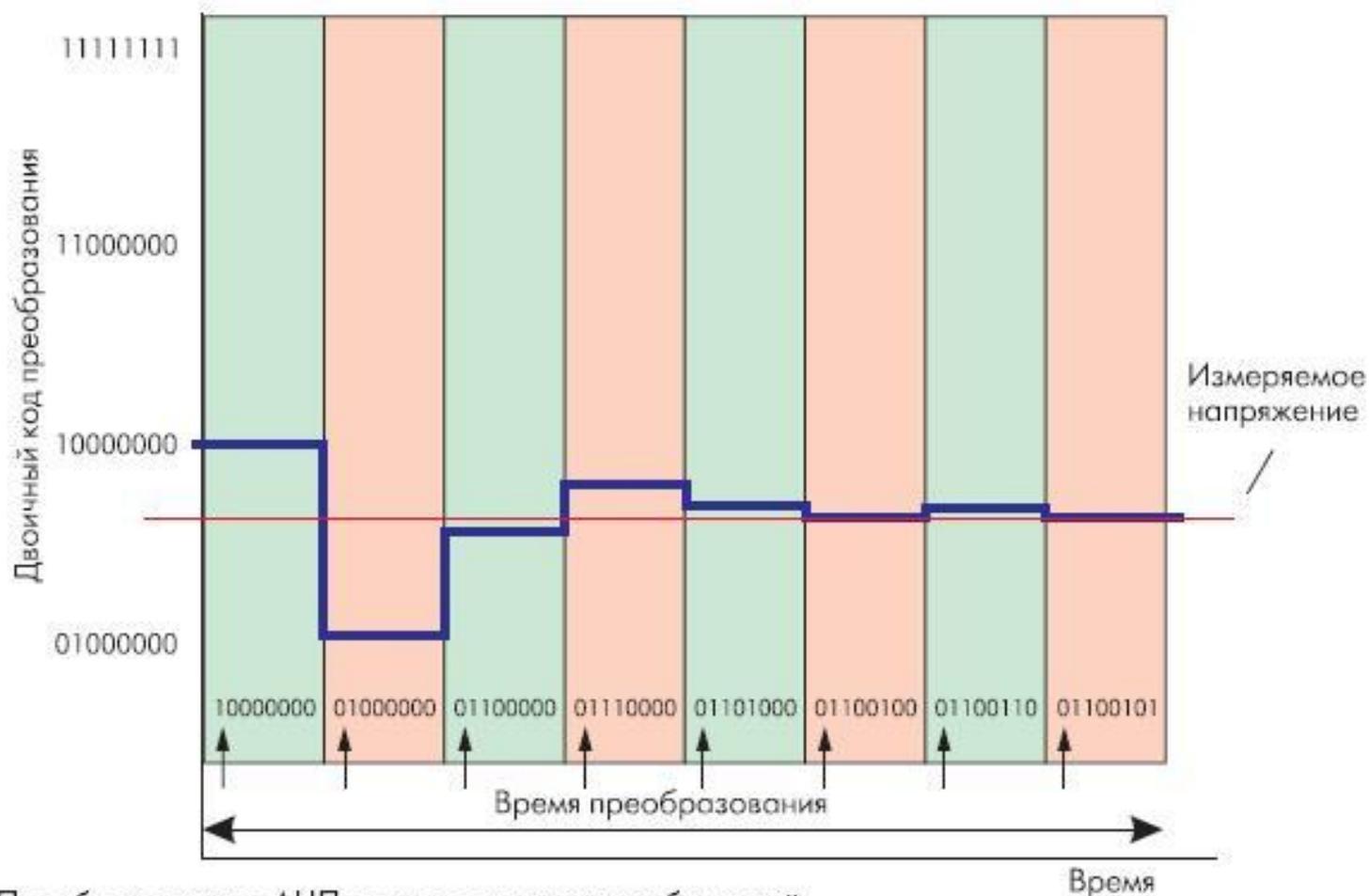


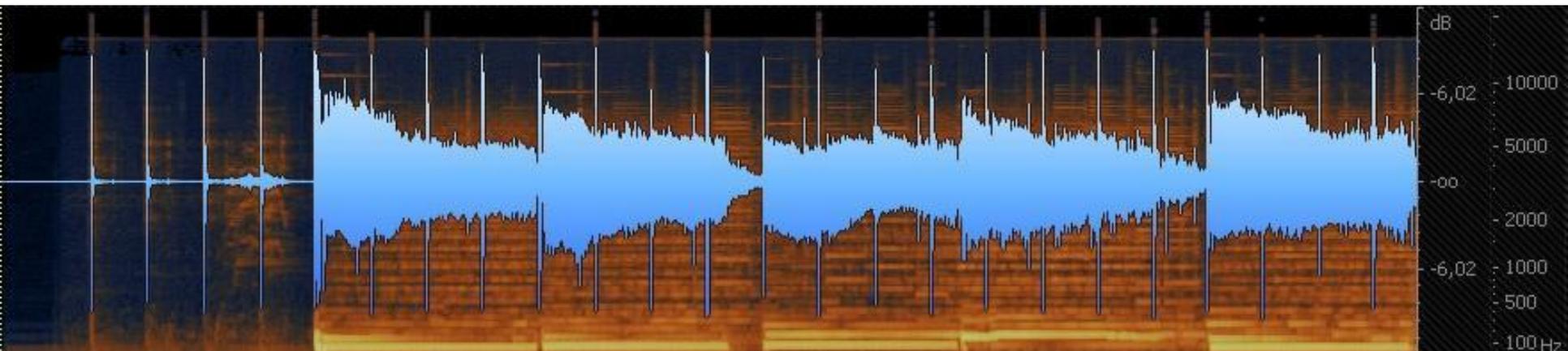
Рис. 4. Преобразование в АЦП последовательных приближений

Аналого-цифровые преобразователи

Звукозапись



Звуковая карта



Гистограмма громкости и изменение спектра звука с течением времени

Аналого-цифровые преобразователи

Измерительные приборы



Многофункциональный
вольтметр



Электронный осциллограф

Цифро-аналоговые преобразователи

Воспроизведение аудио/видео



CD-плеер



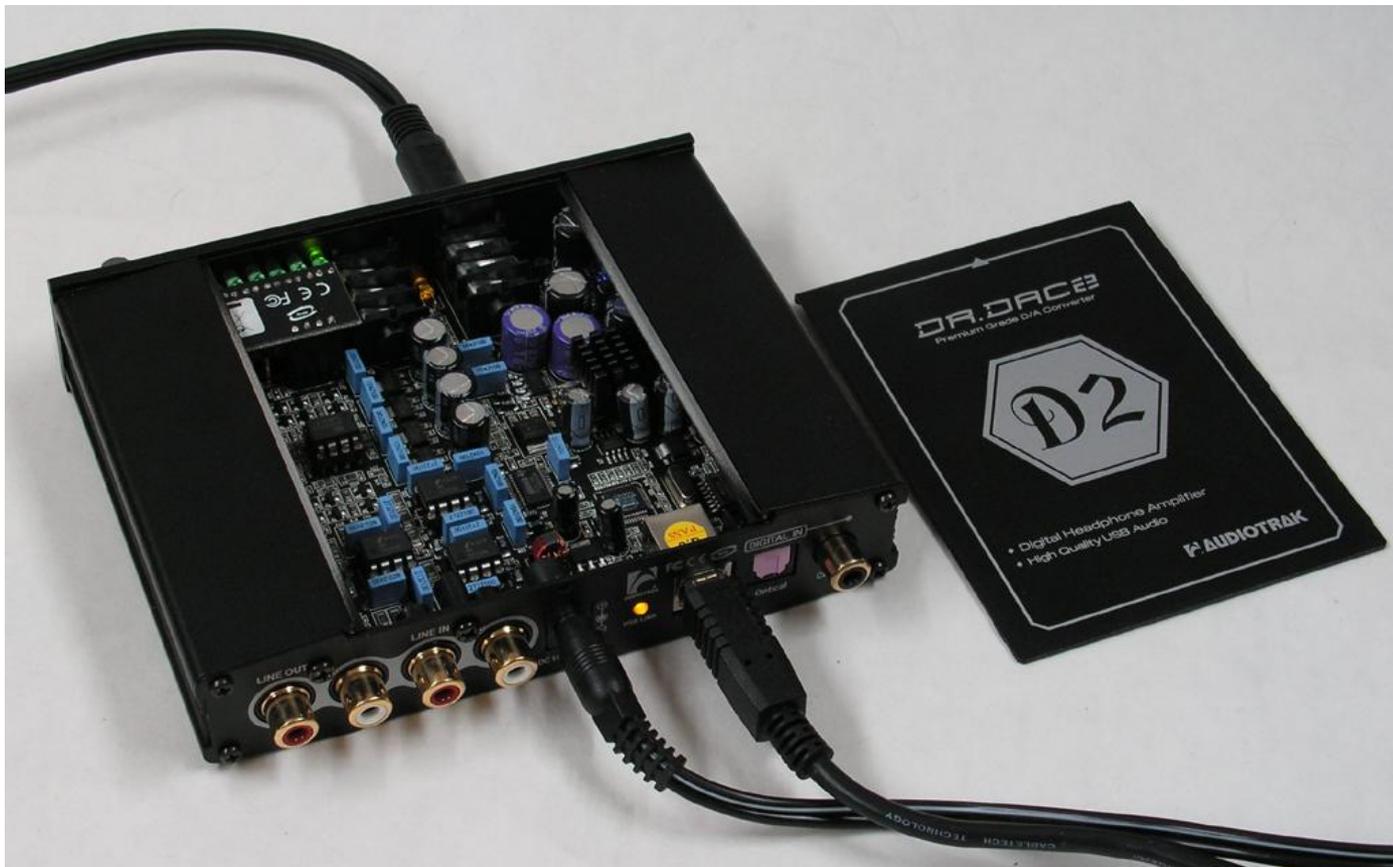
Портативный CD/DVD-проигрыватель



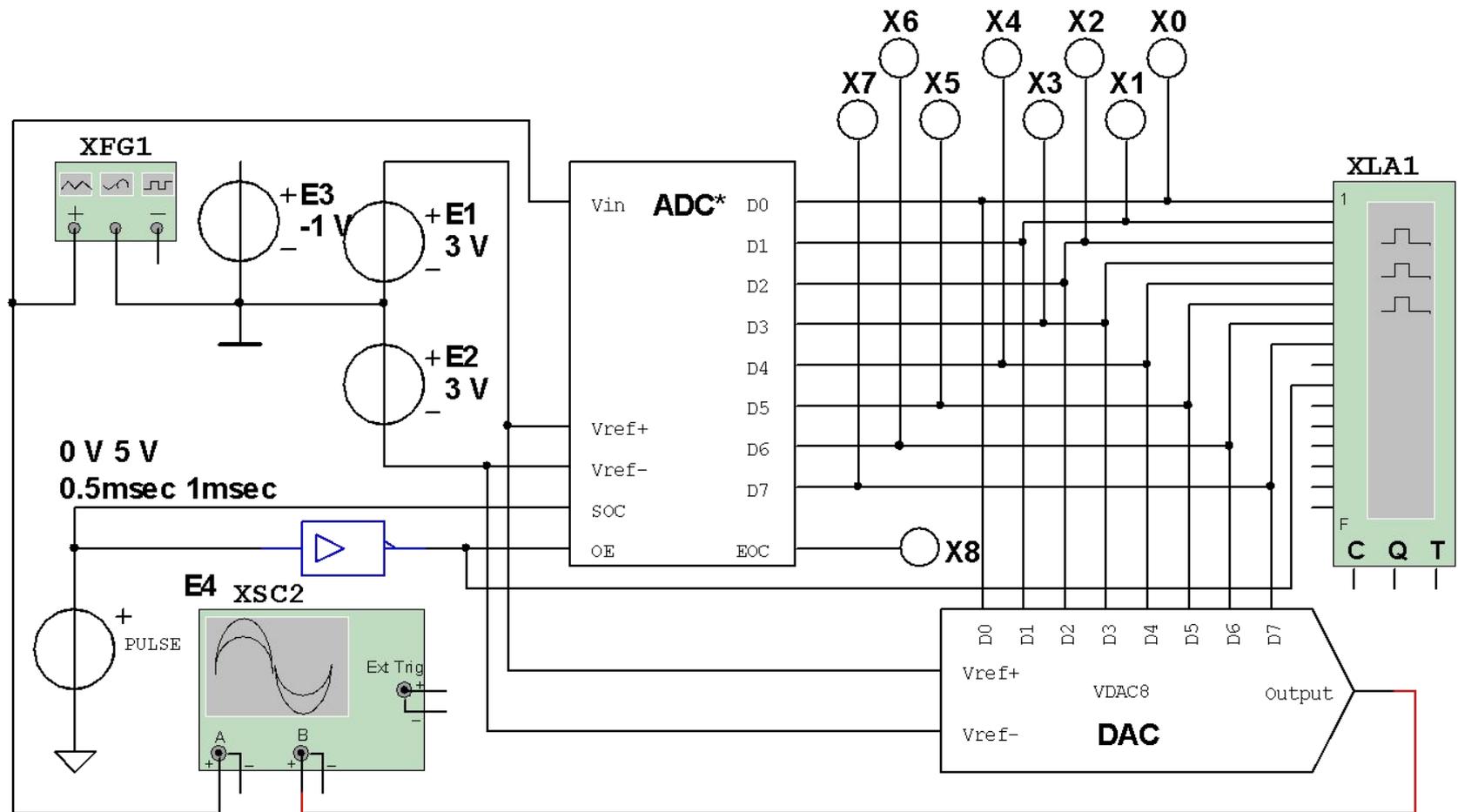
DVD-проигрыватель

Цифро-аналоговые преобразователи

Профессиональная работа со звуком



Универсальное устройство: ЦАП (подключение к компьютеру),
усилитель



Вопросы?



Точность измерений

Причины погрешностей:

- Ошибки квантования
- Нелинейность
- Апертурная погрешность

Проблемы точности

Ошибки квантования

- Абсолютная величина ошибки находится в пределах от нуля до половины МЗР (Младший Значащий Разряд)
- Ошибка обычно имеет равномерное распределение
- Ошибка не коррелирована со входным сигналом
- Среднеквадратическое значение ошибки лежит в пределах от 0,01% до 0,2%

Проблемы точности

Нелинейность

- Интегральная нелинейность (INL) — максимальное отклонение реальной характеристики преобразования от прямой линии
- Дифференциальная нелинейность (DNL) — разность между фактическим значением кванта преобразования в заданной точке характеристики преобразования и идеальным значением, равным МЗР

Проблемы точности

Апертурная погрешность

Нестабильность задающего генератора
отсчётов



Непостоянство интервала дискретизации



Фазовое дрожание цифрового сигнала данных



Погрешность

Литература

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Digital-to-analog_converter
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter
3. <http://www.efo.ru/doc/Silabs/Silabs.pl?2089>
4. <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/adc/index.htm>
5. <http://www.intuit.ru/department/hardware/digs/13/>