

## Литература

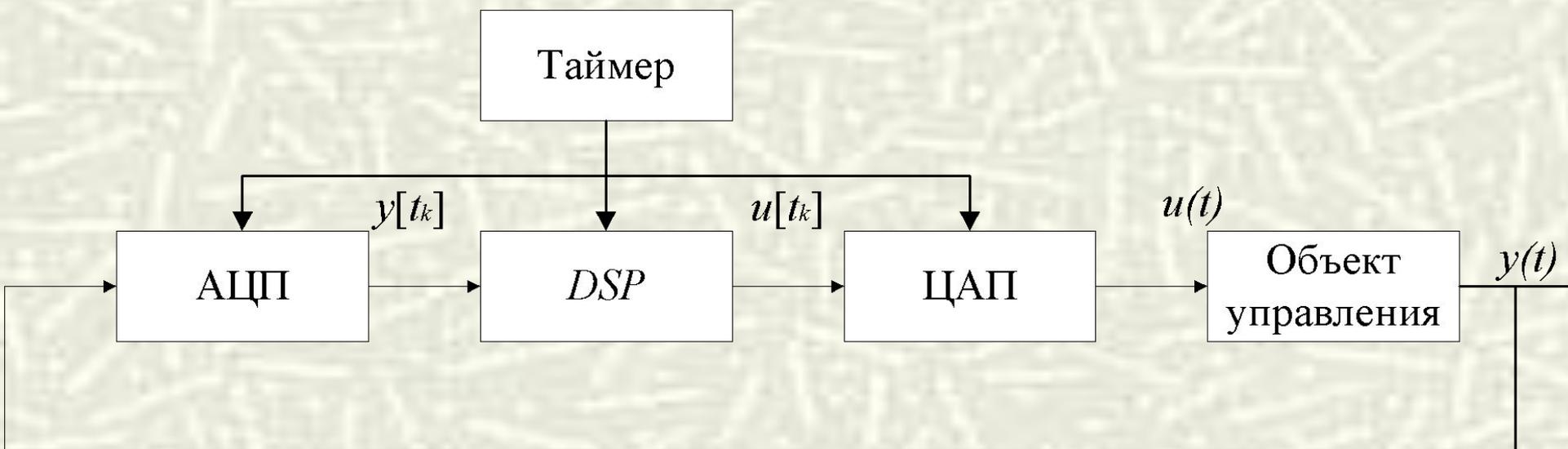
1. Айфицер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992с.
2. Баранов Л.А. Модели систем автоматического управления. – М.: МИИТ, 2008. – 552 с.
3. Сидоренко В. Г., Егорова Е.В., Хачатурян А.Р., Федоров А.В. Сборник типовых задач по дисциплине «Цифровая обработка сигналов». – М.: МИИТ, 2004. – 132с.

## Литература

4. Сидоренко В. Г. Задачи цифровой обработки сигналов: Методические указания. Ч. 2. – М.: МИИТ, 1999. – 40с.
5. Сидоренко В.Г., Андреев Д.А., Петров А.Г., Фёдоров А.В. Интегрированная среда разработки программного обеспечения для сигнальных процессоров *Visual DSP*: Методические указания к лабораторным работам. – М.: МИИТ. 2003. – 53 с.

# Методы и средства цифровой обработки информации

**Цифровая обработка сигналов (ЦОС)** – наука, изучающая методы и алгоритмы обработки цифровых сигналов и занимающаяся разработкой аппаратных и программных решений соответствующих систем.



# **Методы и средства цифровой обработки информации**

---

**Цифровая обработка информации (ЦОИ)** подразделяется на первичную и вторичную.

**Первичная обработка** обеспечивает преобразование сигналов, поступающих на вход системы ЦОИ в аналоговом или цифровом виде в набор цифровых данных для последующей (вторичной) обработки. Поэтому для ее обозначения получил широкое распространение термин «цифровая обработка сигналов» (ЦОС).

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Иерархическая организация системы ЦОИ



# Методы и средства цифровой обработки информации

Режим реального времени предъявляет жесткие ограничения как на время решения задач вычислительными средствами ЦОИ, так и на скорость информационного обмена, обеспечиваемую средствами интерфейса. Время решения задачи не должно превышать максимальное время обмена сообщениями между устройствами  $T_{обм\ max}$ , для которых она решается, т.е.

$$\frac{T_{обм\ max}}{T_p} \geq 1$$

# **Методы и средства цифровой обработки информации**

---

**В ходе вторичной обработки информации решаются задачи распознавания образов на основе анализа спектров сигналов, полученных в процессе ЦОС, а также задачи управления и цифрового моделирования, контроля и диагностики, обработки статистических данных и другие, характеризующиеся самыми различными алгоритмами.**

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

## Применение ЦОИ

- 1. Измерительная техника** (цифровые фильтры, анализаторы спектра, усреднители, генерация и анализ импульсов, химические измерения, астрономия).
- 2. Высокоскоростные системы управления** (сервоприводы, позиционный и скоростной контроль, робототехника, адаптивное и контекстное управление).
- 3. Обработка речи** (анализ, синтез, сжатие речевой информации, хранение и предсказание речевых сообщений, подавление помех).

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

## Применение ЦОИ

- 4. Цифровая аудиотехника и обработка музыки** (анализ звуков музыкальных инструментов, музыкальные синтезаторы, цифровые студии звукозаписи и домашнее цифровое воспроизведение, коррекция ошибок, подавление динамических шумов).
- 5. Техника связи** (высокоскоростные модемы, адаптивные эквалайзеры, амплитудная, частотная, фазовая модуляция/демодуляция, подавление эха, блоки шифрования).

## Применение ЦОИ

**6. Быстродействующие цифровые процессоры** (обработка массивов, ускорители обработки данных с плавающей запятой для микрокомпьютеров, векторные и матричные процессоры, трансцендентные функции, искусственный интеллект, параллельные процессоры, предсказание погоды и моделирование атмосферных явлений).

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Применение ЦОИ

- 7. Обработка изображений** (искусственный глаз, томография, обработка изображений сонаров и радаров, цифровое телевидение - видео ЦОС процессоры, спутниковое телевидение, изучение ресурсов Земли, сжатие изображений).
- 8. Создание графических образов** (управление образами: размеры, тени; векторные манипуляции, рабочие станции для САПР, генераторы трехмерных изображений, эмуляция полетов и других передвижений, создание фильмов).

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Применение ЦОИ

9. **Связь с окружающей средой.**
10. **Медицина и биотехнологии** (создание изображений при ультразвуковых исследованиях, контроль состояния пациентов (интенсивная терапия, ЭКГ), искусственный глаз, томография).
1. **Навигация** (радары, сонары, составление карт морского дна).
2. **Сейсмология.**
3. **Интегрированные приложения** (преобразование печатного текста в речевое сообщение, телефония, автопилот).

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Основные задачи ЦОС

Направление	Пример задач
Линейная фильтрация	Селекция сигнала в частотной области; синтез фильтров, согласованных с сигналами; частотное разделение каналов; цифровые преобразователи Гильберта и дифференциаторы; корректоры характеристик каналов
Спектральный анализ	Обработка речевых, звуковых, сейсмических, гидроакустических сигналов; распознавание образов
Частотно-временной анализ	Компрессия изображений, гидро- и радиолокация, разнообразные задачи обнаружения
Адаптивная фильтрация	Обработка речи, изображений, распознавание образов, подавление шумов, адаптивные антенные решётки
Нелинейная обработка	Вычисление корреляций, фильтрация; синтез амплитудных, фазовых, частотных детекторов, обработка речи, векторное кодирование
Многоскоростная обработка	Интерполяция (увеличение) и децимация (уменьшение) частоты дискретизации в многоскоростных системах телекоммуникации, аудиосистемах

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

Множество задач, решаемых ЦОС, подразделяется на две группы: **анализ сигналов и их синтез**. Задачей **анализа** сигналов является выделение небольшой группы значимых параметров, максимально полно описывающих сигнал. Обычно полученные параметры подвергаются обработке. Принадлежность полученных параметров к некоторому классу позволяет с большой долей уверенности говорить о принадлежности к этому же классу и анализируемого сигнала.

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

**Средства анализа сигналов должны работать автоматически и быстро.**

Параметры сигнала должны быть физически значимы. Наибольшее распространение получили частотный (спектральный), частотно-временной, масштабно-временной анализ и их комбинации.

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

**Синтез** сигналов по совокупности описывающих их параметров – процедура, обратная анализу. В этом случае целью обработки сигналов может быть:

- более экономное представление сигнала (его сжатие);
- удаление из сигналов нежелательных шумов;
- улучшение качества звучания речи, музыки, модификация ее спектра;
- изменение свойств изображения (контраста, цветовой насыщенности, резкости).

# Методы и средства цифровой обработки информации

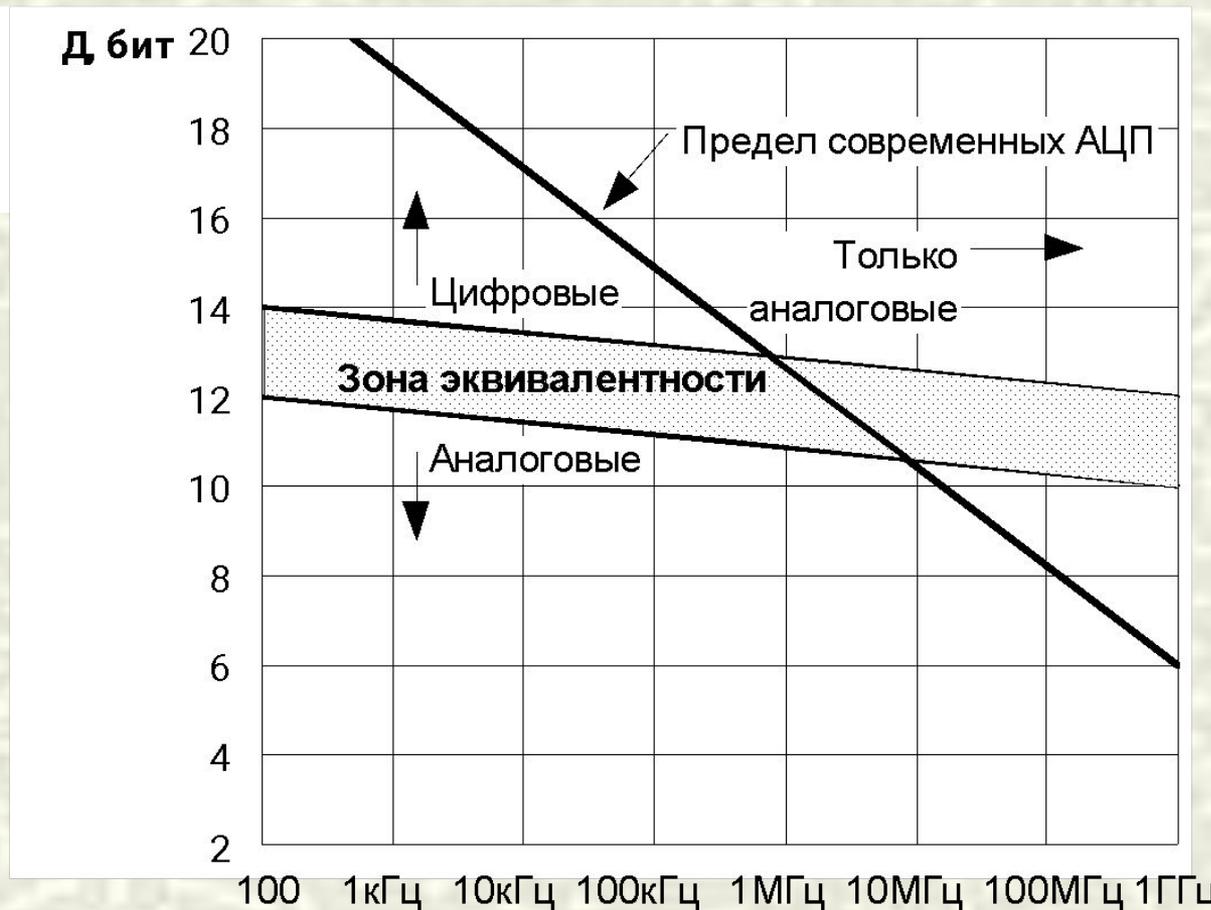
---

В результате синтеза получается **реконструированный (восстановленный)** сигнал. Если реконструированный сигнал является точной копией исходного сигнала (возможно, лишь задержанной на некоторое время и умноженной на константу), то схема анализа-синтеза называется **схемой с полным восстановлением**.

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Предпочтительные области применения аналоговых и цифровых методов

Разрядность АЦП, бит



Полоса пропускания канала

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Преимущества ЦОИ

1. Детерминированность обработки.
2. Гибкость.
3. Более широкий динамический диапазон:

$$20 \lg \frac{N_{\max}}{N_{\min}} [\text{дБ}]$$

В аналоговой технике примерно около 60 дБ– 1000 раз, в цифровой технике динамический диапазон ограничен памятью и

быстродействием

$$20 \lg \frac{2^{16}}{1} = 20 \lg 65536 \approx 96 [\text{дБ}]$$

100\*1000 можно только в цифровом виде.

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

**Процесс внедрения ЦВМ в системы управления**

**Начальный этап (с 1955 г.).**

**Время выполнения операции сложения - 1 мс.**

**Время выполнения операции умножения - 20 мс.**

**Среднее время наработки на отказ (*MTBF- Mean Time Between Failures*) - 50—100 ч. (2-4 суток).**

**Количество входных данных - контроль 26 материальных потоков, температуры в 72 точках, давления в трех точках и химический состав трех смесей.**

**Функции и проблемы - управление через оператора и управление по контрольным точкам. Возникла потребность в построении моделей процессов, идентификации систем. Органы управления аналоговые.**

**Количество систем - к марту 1967 г. - 37, в 1968 – 159.**

# Методы и средства цифровой обработки информации

Процесс внедрения ЦВМ в системы управления

Этап прямого цифрового управления (с 1962 г.).

Время выполнения операции сложения – 100 мкс.

Время выполнения операции умножения - 1 мс.

Среднее время наработки на отказ (*MTBF- Mean Time Between Failures*) - 1000 ч. (40 суток).

Количество входных данных - измерение 224 параметров и непосредственный контроль 129 вентилей.

Функции и проблемы – те же.

Появились **цифровой** дисплей и несколько кнопок.

**Стоимость.** Начальная цена ЭВМ была велика, стоимость новых и дополнительных контуров была незначительна, «удельная» цена цифровых систем управления падала при увеличении их размеров.

# **Методы и средства цифровой обработки информации**

---

**Процесс внедрения ЦВМ в системы управления**

**Этап мини-компьютерной техники (с 1967 г.).**

**Время выполнения операции сложения - 2 мкс.**

**Время выполнения операции умножения - 7 мкс.**

**Среднее время наработки на отказ (*MTBF- Mean Time Between Failures*) – 20 000 ч. (2 года).**

**Количество входных данных - длина слова 16 бит (первичная память составляла 8—124 К слов, а в качестве вторичной памяти обычно использовался накопитель на магнитном диске); .**

**Количество систем - 5000 -1970 г., 50000 - 1975г.**

**Стоимость - 10000 долл., т. е. даже небольшая система управления редко стоила меньше 100 тыс. долл.**

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

**Процесс внедрения ЦВМ в системы управления**

**Этап микропроцессорной техники (с 1972 г.).**

**Стоимость** одноплатной ЭВМ (с возможностями мини-компьютера 1975 г.) в 1980 г. упала до 500 долл., модуль -50 долл. за изделие.

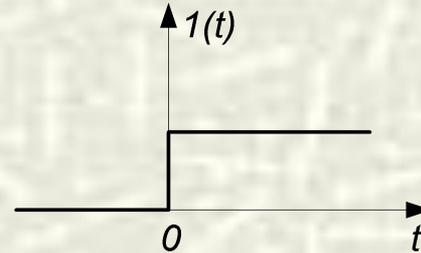
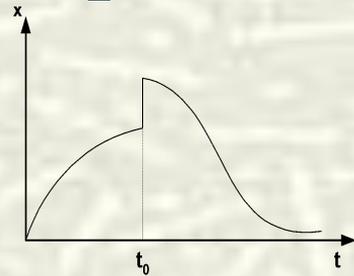
**В настоящее время**

**Среднее время наработки на отказ (*MTBF- Mean Time Between Failures*)** блоков 10-30 лет, наименее надежные – клавиатуры, надежность оценивается по числу нажатий.

## Основные типы сигналов.

— **аналоговый** входной сигнал непрерывен как по времени, так и по амплитуде. Сигнал называется **непрерывным** если он описывается однозначной функцией непрерывно изменяющегося аргумента  $t$ , определенной для всех значений  $t$  на заданном интервале за исключением, возможно, счетного множества точек. Определение непрерывного сигнала не совпадает с определением непрерывной функции. Непрерывный сигнал может быть описан функцией, имеющей точки разрыва.

## Примеры аналоговых сигналов



Основные типы сигналов:

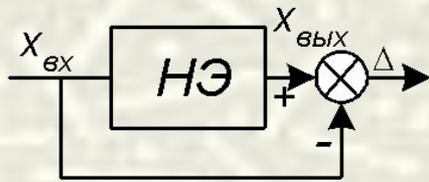
– **дискретный** сигнал непрерывен по амплитуде, но определен только в дискретных точках времени;

– **цифровой** сигнал существует только в дискретных точках времени и может иметь только одно из заданного конечного множества значений (дискретный во времени сигнал с дискретной амплитудой).

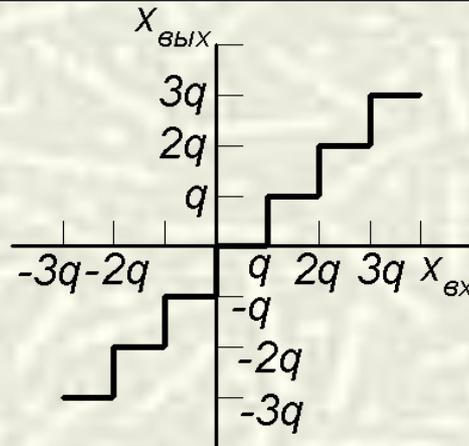
# Методы и средства цифровой обработки информации

**Квантование** сигнала – это преобразование сигнала, непрерывного по уровню в дискретный по уровню сигнал, отображающий исходный сигнал с заранее установленной ошибкой. Операция квантования связана с округлением непрерывной величины. Если нелинейный элемент округляет аналоговый сигнал  $x_{вх}$  в соответствии с характеристиками, приведенными на рис. б и в, то максимальная погрешность квантования равна  $q$  – шагу квантования по уровню. В том случае, когда округление реализуется нелинейным элементом, имеющим характеристику, симметричную относительно оси ординат (рис. г), максимальное значение погрешности определяется величиной  $q/2$ .

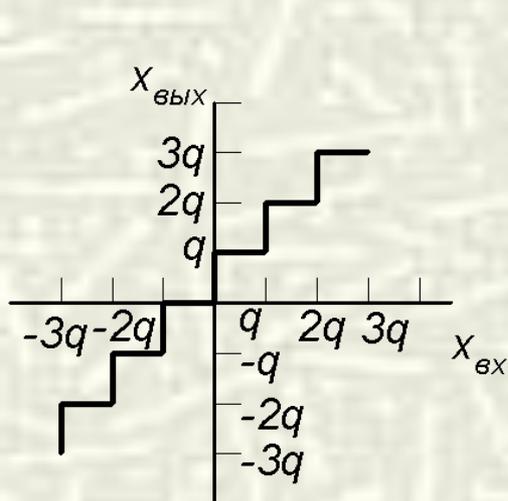
# Методы и средства цифровой обработки информации



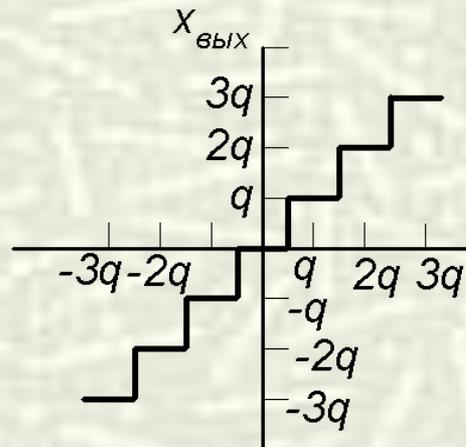
а)



б)



в)



г)

Погрешность квантования по уровню для базовой характеристики НЭ функционально связан с входной величиной в соответствии с рис. 1.11, г, следующим образом:

$$\Delta = kq - x_{вх}$$

$$\text{при } kq - 0,5q \leq x_{вх} \leq kq + 0,5q,$$

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

**Дискретизация** – это определение значений аналогового сигнала в дискретные моменты времени, как правило, отстающие друг от друга на равные интервалы времени:

$$t = t_0 + nT \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

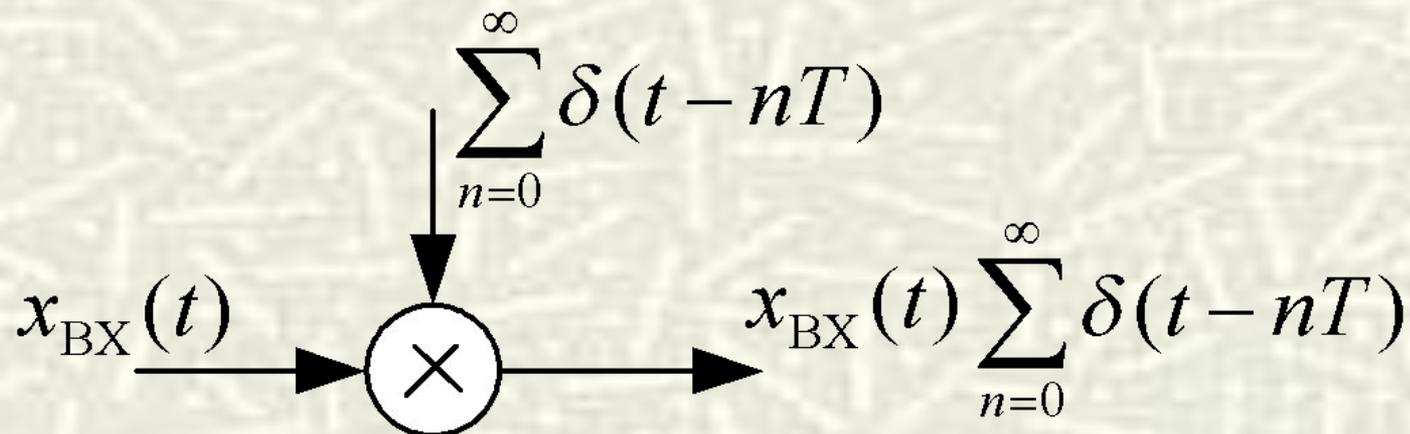
В этом случае сигнал зависит от дискретной независимой переменной  $n$ .

# Методы и средства цифровой обработки информации

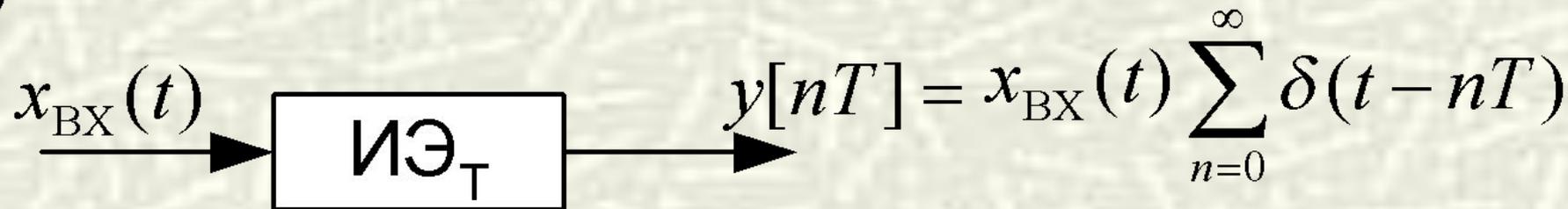
а) – Модель преобразования непрерывной функции в решётчатую;

б) – Идеальный импульсный элемент

а)



б)



# Методы и средства цифровой обработки информации

**Идеальный импульсный элемент (ИИЭ)** - элемент, преобразующий функцию непрерывного времени  $t$  в решетчатую функцию.

**Решетчатая функция**  $x_{ex}(t) \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT)$

представляет собой последовательность функций  $\delta$ ,  $\delta(0), \delta(T), \delta(2T), \dots$  веса (коэффициенты) которых определяются значениями функции  $x_{ex}(t)$  в момент  $t = nT$ .

Сигнал на выходе ИИЭ:

$$y[nT] = x_{ex}(t) \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT)$$

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

**Временная дискретизация** непрерывного сигнала, является **линейной операцией**. **Квантование по уровню** нелинейно. Однако, учитывая, что **максимальная погрешность** квантования по уровню невелика, ею можно пренебречь и, **линеаризовать** характеристику идеального квантования. Поэтому в дальнейшем будем считать, что преобразование непрерывного сигнала в цифровой выполняется **линейным оператором**.

# Методы и средства цифровой обработки информации

**Оператор** ставит в соответствие функции функцию.

$$F(\bar{x}_{вх}(t)) = \bar{x}_{вых}(t) .$$

Оператор  $F$  называется **линейным**, если он удовлетворяет двум определениям (свойствам, аксиомам).

1. **Свойство однородности.**

Пусть  $F(x) = y$ , тогда  $F(\lambda x) = \lambda y$  ,

где  $\lambda$  – вещественное число.

2. **Свойство аддитивности.**

Пусть  $F(x_1) = y_1$  и  $F(x_2) = y_2$  , тогда .

$$F(x_1 + x_2) = F(x_1) + F(x_2) = y_1 + y_2$$

Указанные условия определяют принцип суперпозиции: реакция линейной системы на сумму входных сигналов равна сумме реакций системы на каждый из этих входных сигналов.

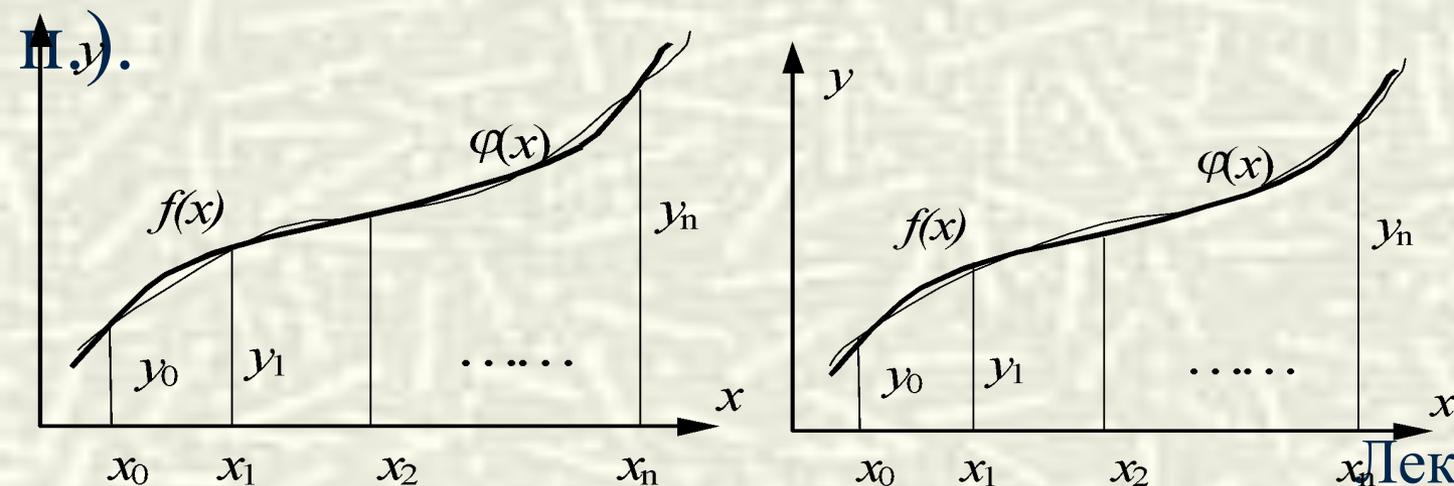
**Нелинейность** – свойство отсутствия

## АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИЙ

*Аппроксимация* – это приближение одних функций другими, более простыми.

Причины использования аппроксимации:

1. Сложность вычисления функции.
2. Задание функции по результатам эксперимента (физического, математического и т.



## АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИЙ

Табличное задание функции  $y=f(x)$ .

$x_i$	$x_0$	$x_1$	.....	$x_n$
$y_i$	$y_0$	$y_1$	.....	$y_n$

$x_i$  – узлы аппроксимации  $i=0, 1, \dots, n$ ;

$y_i=f(x_i)$  – значения функции в узлах

аппроксимации.

Функция  $\phi(x)$ , используемая вместо  $f(x)$ , называется аппроксимирующей функцией.

Близость функций  $f(x)$  и  $\phi(x)$  получают введением в аппроксимирующую функцию свободных параметров  $\phi(x, a_0, a_1, \dots, a_n)$  и их выбором.

## АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИЙ

*Интерполяция* – частный случай аппроксимации, когда функции  $\phi(x)$  и  $f(x)$  совпадают в узлах, т.е.  $\phi(x_i) = f(x_i)$ .

Другой смысл термина *интерполяция* (интер – внутри, между, латин.) – приближение функции между узлами.

*Экстраполяция* (экстра – вне, сверх, дополнительно, латин.) – приближение функции вне узлов.

## АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИЙ

Если аппроксимирующая функция  $\phi(x)$  линейно зависит от параметров  $a_i$ , то *интерполяция линейная*, например ,  
где  $\phi_j(x)$  – известные функции;  
 $\alpha_j$  – неизвестные коэффициенты.

Виды функций  $\phi_i(x)$ :

- а) многочлены;
- б) тригонометрические функции;
- в) дробно-рациональные функции и др.

# **Методы и средства цифровой обработки информации**

---

## **Аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).**

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – устройство, преобразующее входной сигнал в дискретный код (цифровой сигнал). Обратное преобразование осуществляется при помощи ЦАП (цифро-аналогового преобразователя).

АЦ преобразование включает в себя три этапа:

Дискретизация по времени;

Квантование по уровню;

Кодирование.

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

**АЦП** – электронное устройство, преобразующее напряжение в двоичный цифровой код. Существуют неэлектронные АЦП – преобразователи «угол-код».

**Разрешение (разрядность) АЦП** характеризует количество дискретных значений, которые преобразователь может выдать на выходе. Измеряется в битах. Например, АЦП, способный выдать 256 дискретных значений (0..255), имеет разрядность 8 бит, поскольку  $2^8 = 256$ .

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

**Разрешение** может быть также определено в терминах входного сигнала и выражено, например вольтах. Разрешение по напряжению равно напряжению, соответствующему максимальному выходному коду, деленному на количество выходных дискретных значений.

# Методы и средства цифровой обработки информации

---

## Пример 1

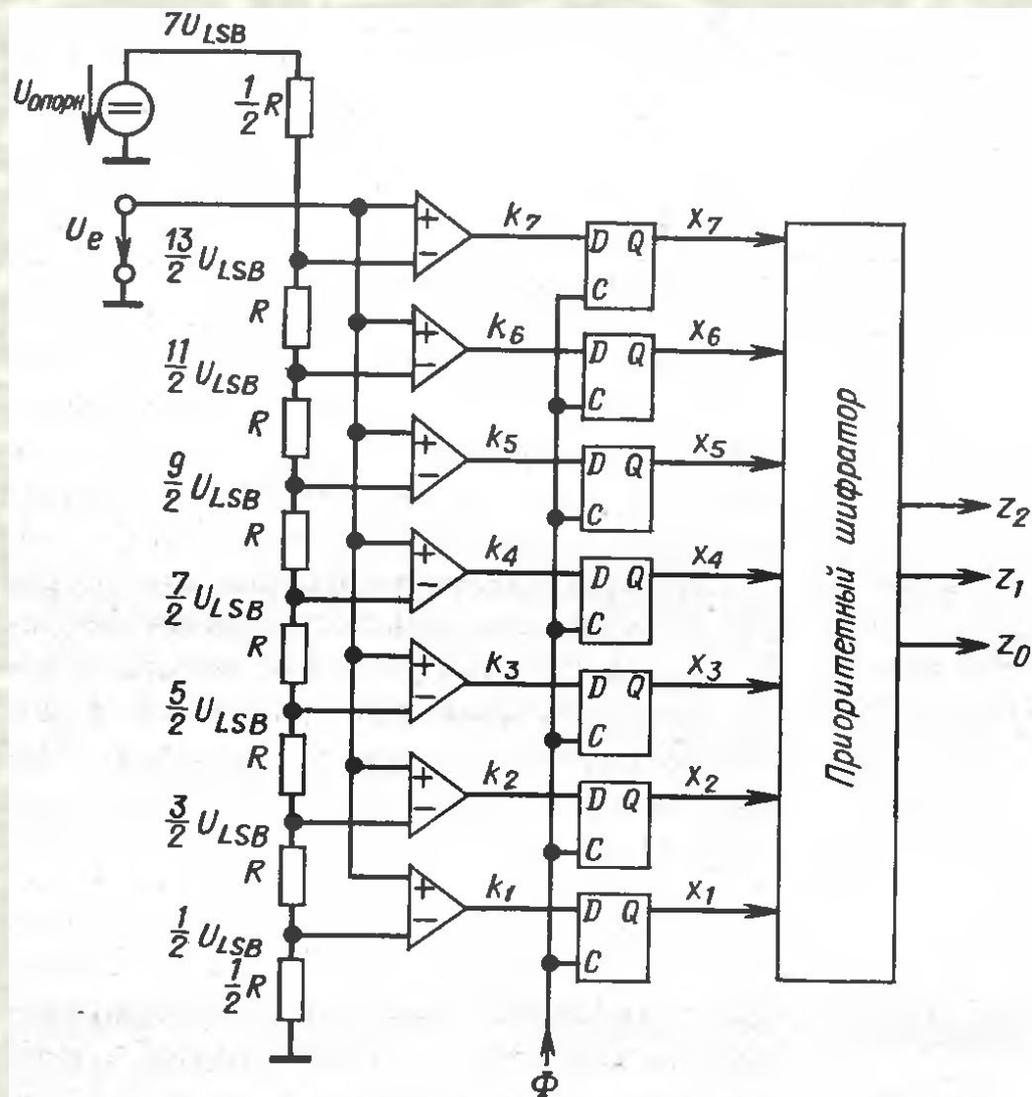
Диапазон входных значений = от 0 до 10 вольт

Разрядность АЦП 12 бит:  $2^{12} = 4096$  уровней  
квантования

Разрешение по напряжению:  $(10-0)/4096 = 0.00244$   
вольт = 2.44 мВ

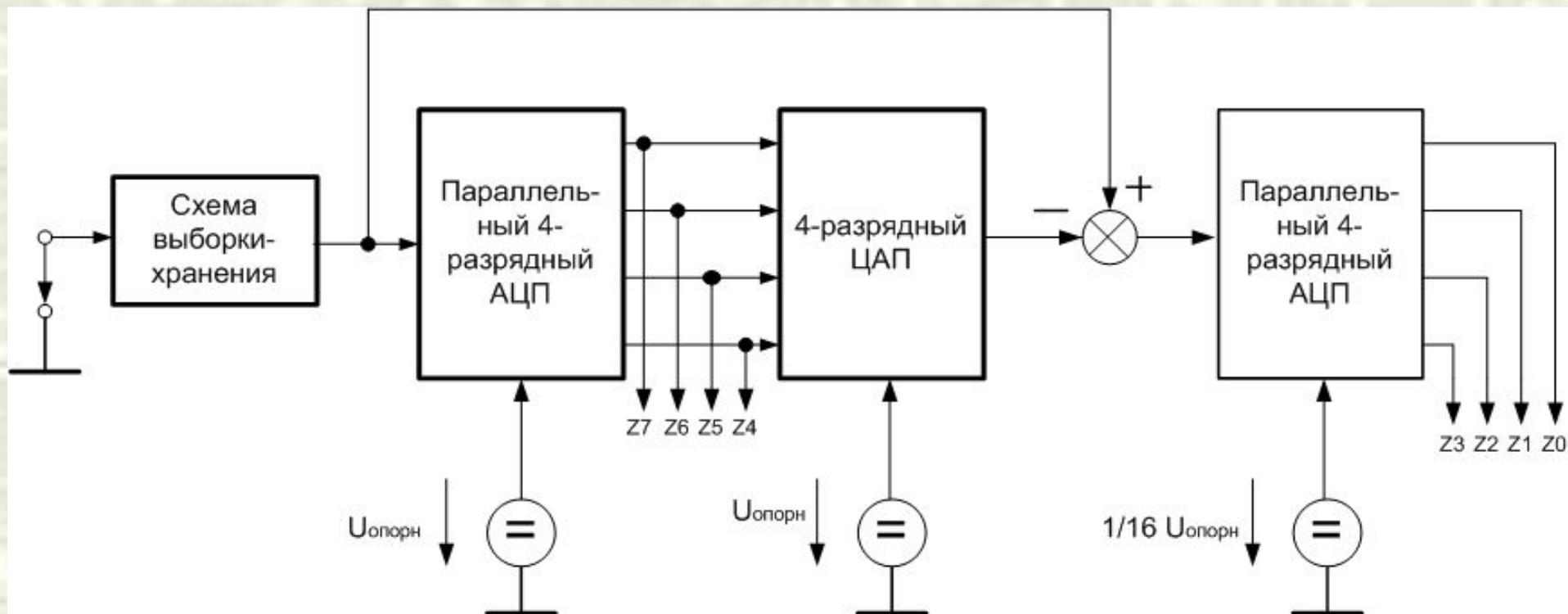
# Методы и средства цифровой обработки информации

## АЦП, работающий по параллельному методу



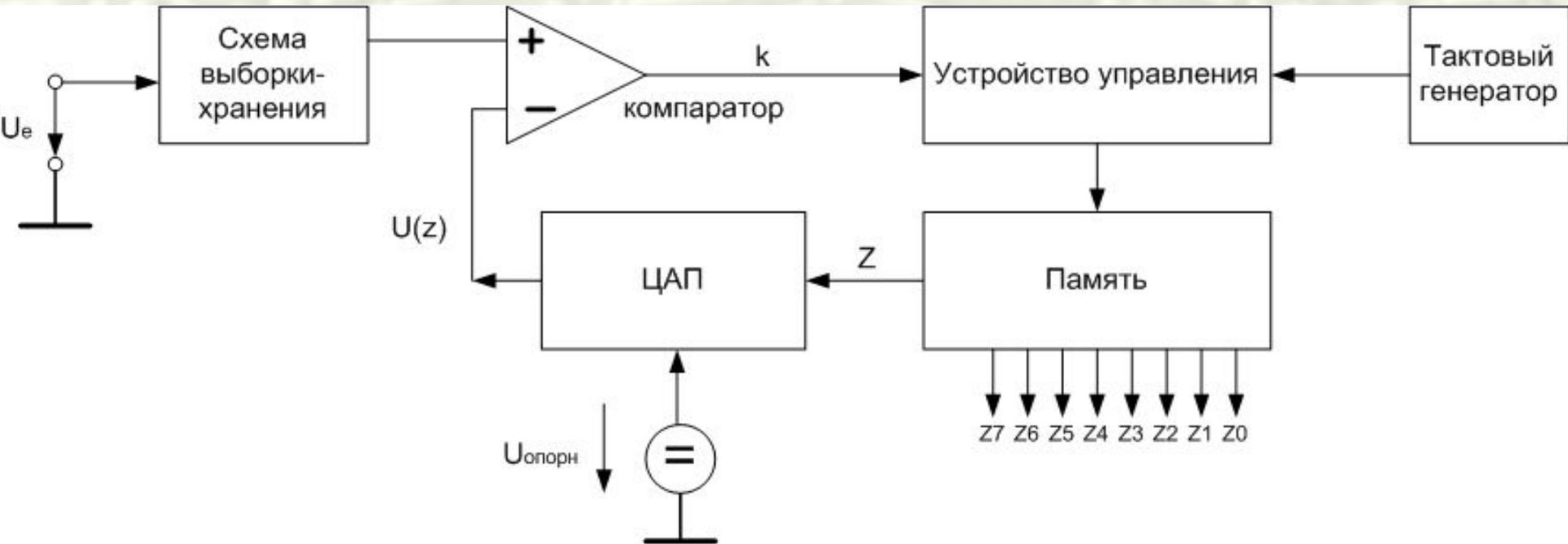
# Методы и средства цифровой обработки информации

## АЦП, реализующий модифицированный параллельный метод



# Методы и средства цифровой обработки информации

## АЦП, работающий по весовому методу



АЦП, работающий по весовому методу

# Методы и средства цифровой обработки информации

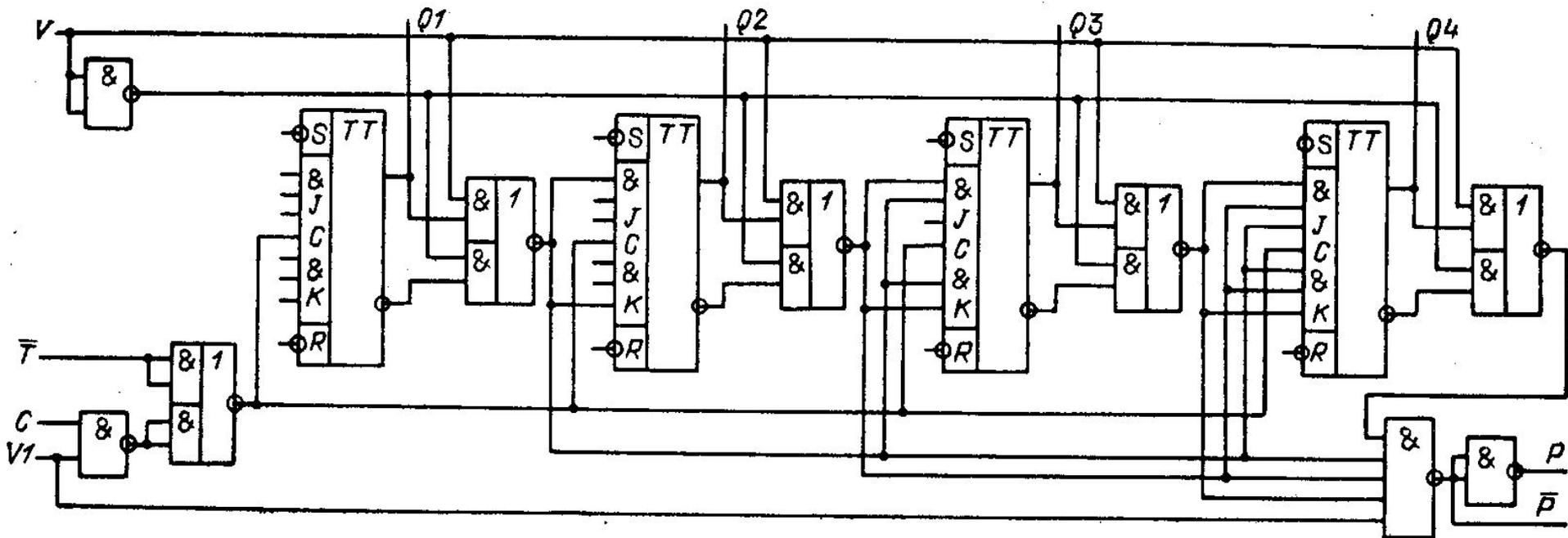
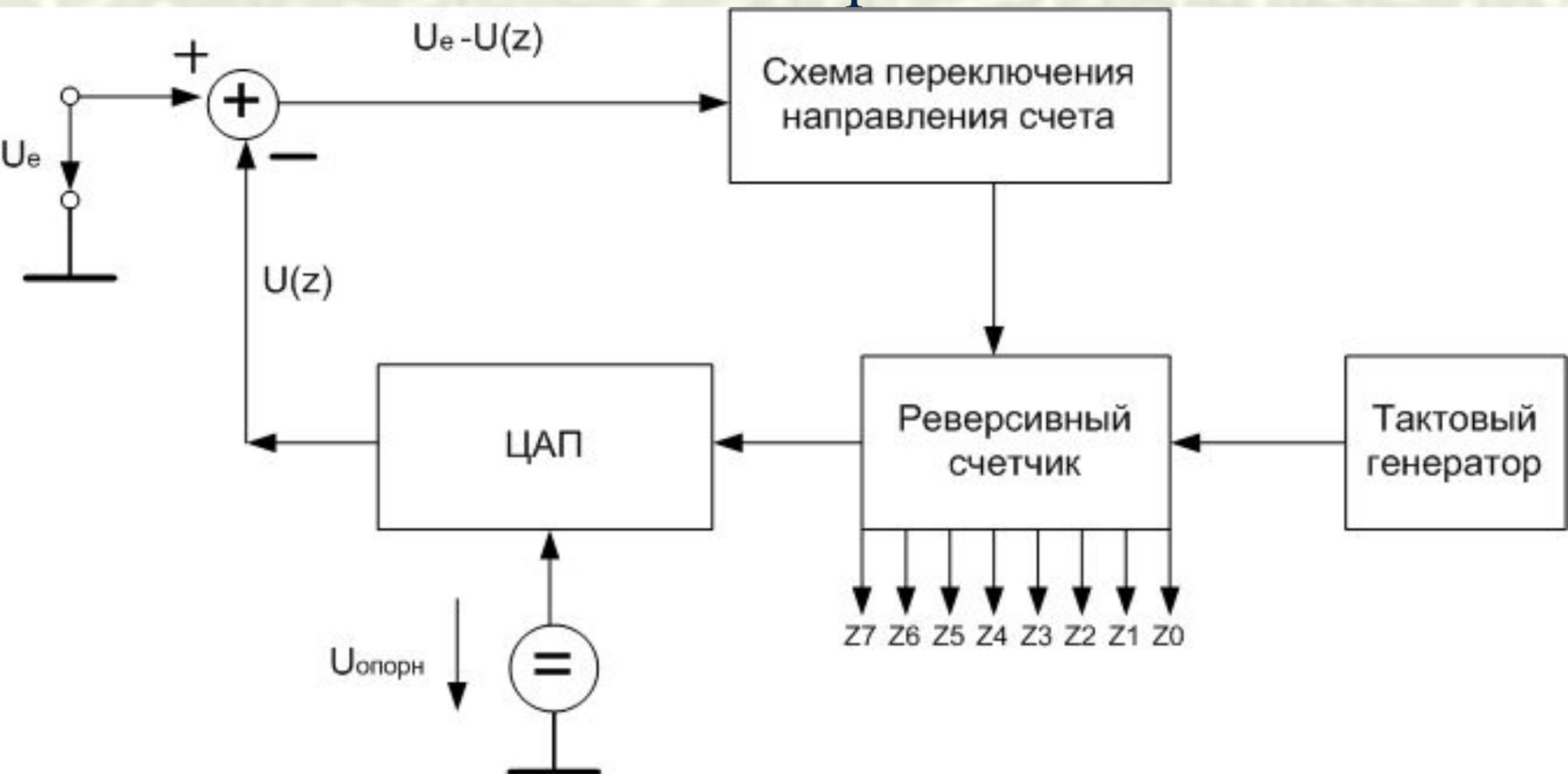


Рис. 5.24. Синхронный двоичный реверсивный счетчик с параллельным переносом

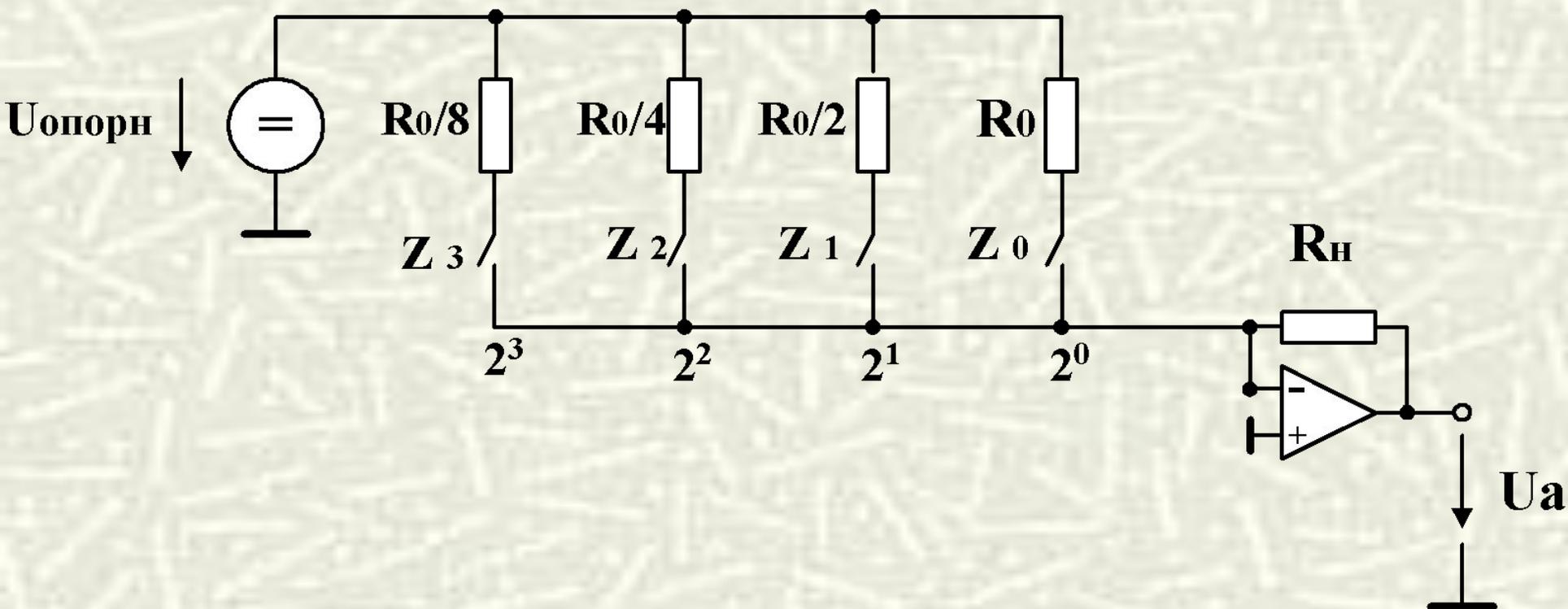
# Методы и средства цифровой обработки информации

## Построение АЦП по компенсационному методу с постоянным выравниванием



# Методы и средства цифровой обработки информации

## Принципиальная схема ЦАП



# Методы и средства цифровой обработки информации

## Типы преобразований.

1. Свертка 2-х последовательностей или массивов X

и A:

$$y[n] = \sum_{k=0}^N a[k]x[n-k]$$

$$y(t) = \int_0^t a(\tau)x(t-\tau)d\tau$$

2. Вычисление корреляции:

$$z[k] = \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} \sum_{n=N_1}^{N_2} x[n+k]y[n]$$

$$R_{xz}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x(t)z(t-\tau)dt$$

3. Преобразование Фурье для сигналов дискретного времени

$$X(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{\infty} x[n]e^{-jn\omega T}$$

$$x[n] = \frac{T}{2\pi} \int_{-\pi/T}^{\pi/T} X(e^{j\omega T})e^{jn\omega T} d\omega$$

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Теорема Котельникова

Любая непрерывная функция  $x(t)$ , спектр которой ограничен сверху  $f_m$ , может быть восстановлена без погрешности по своим отсчетным значениям  $x(k\Delta t)$ , взятым с интервалом  $\Delta t$

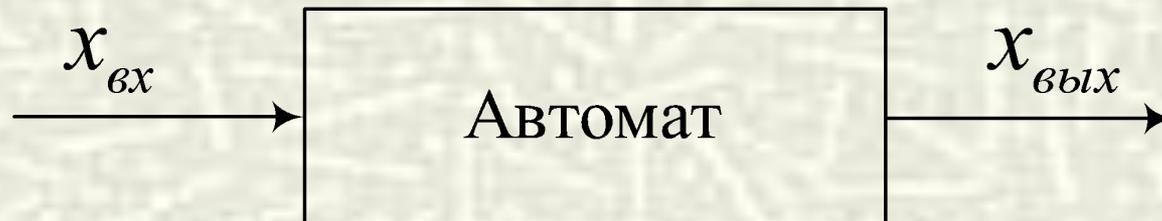
$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_m}$$

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Понятие о разомкнутых и замкнутых системах управления

В разомкнутых системах изменение входного сигнала вызывают изменения сигнала на выходе автомата.

### Структура разомкнутой системы



# **Методы и средства цифровой обработки информации**

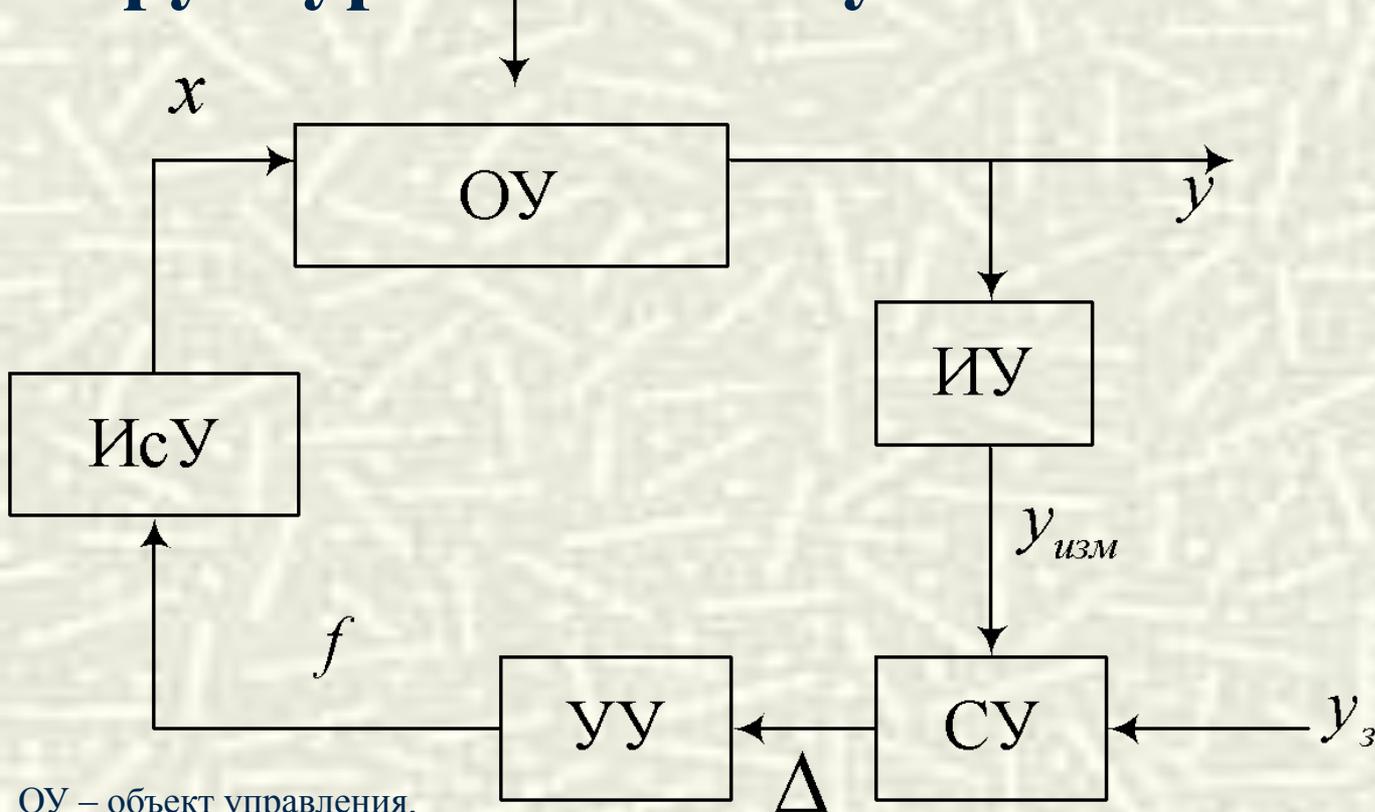
---

## **Понятие о разомкнутых и замкнутых системах управления**

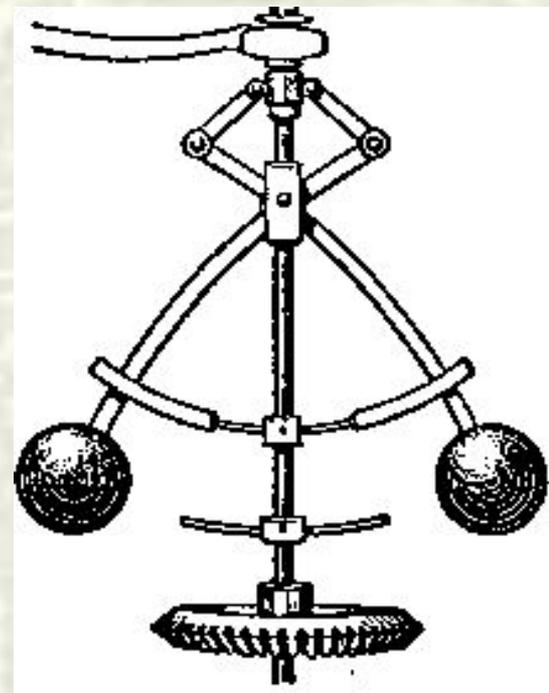
**В замкнутых системах управляющее воздействие – сигнал на входе объекта управления формируется в зависимости от рассогласования заданного и текущего значения управляемой величины.**

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Структура замкнутой системы



ОУ – объект управления,  
ИУ – измерительное устройство,  
СУ – сравнивающее устройство,  
УУ – управляющее устройство,  
ИсУ – исполнительное устройство,  
 $y$  – управляемая величина,  
 $y_3$  – заданное значение управляемой величины,  
 $z$  – возмущения, приложенные к объекту,  
 $x$  – управляющая величина.



Устройство  
Ватта

# **Методы и средства цифровой обработки информации**

---

## **Понятие передаточной функции**

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Понятие частотных характеристик

Пусть модель системы - линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами.

$$x_{ВХ}(t) = U_{ВХ}(\omega) \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$\omega$  частота, имеет свободную и вынужденную составляющие.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{ВЫХ}(t) = U_{ВЫХ}(\omega) \cos(\omega t + \varphi_0 + \varphi(\omega))$$

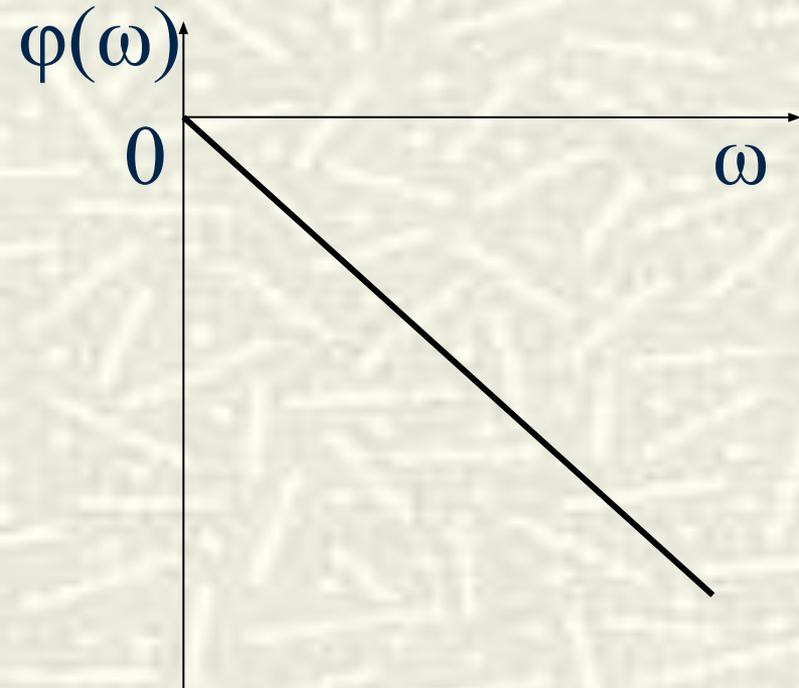
# Методы и средства цифровой обработки информации

**Амплитудно-частотной характеристикой** системы называют зависимость отношения амплитуды гармонического выходного сигнала к амплитуде гармонического входного сигнала от частоты:

$$K(\omega) = \frac{U_{\text{вых}}(\omega)}{U_{\text{вх}}(\omega)}$$

**Фазо-частотной характеристикой**  $\varphi(\omega)$  называют зависимость разности фаз гармонического выходного сигнала и гармонического входного сигнала от частоты.

## Фазо-частотная характеристика



Идеальная ФЧХ - это прямо пропорциональная зависимость с отрицательным коэффициентом наклона.

$$\varphi(\omega) = \alpha\omega \quad \alpha < 0$$

$$x_{вх}(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$\begin{aligned} x_{вых}(t) &= B \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi(\omega)) = B \sin(\omega t + \varphi_0 + \alpha\omega) = \\ &= B \sin(\omega(t + \alpha) + \varphi_0) \end{aligned}$$

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Связь передаточной функции и частотных характеристик

$$x_{BX}(t) = U_{BX} e^{j\omega t} = U_{BX} \cos\omega t + jU_{BX} \sin\omega t$$

$$X_{\text{вх}}(p) = L[U_{\text{вх}} e^{j\omega t}] = \frac{U_{\text{вх}}}{p - j\omega}. \quad K(p) = \frac{M(p)}{N(p)}$$

$$X_{\text{ввых}}(p) = K(p)X_{\text{вх}}(p) = K(p) \frac{U_{\text{вх}}}{p - j\omega} = \frac{M(p)}{N(p)} \frac{U_{\text{вх}}}{p - j\omega}$$

$$x_{\text{ввых}}(t) = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{M(p_k)}{N'(p_k)} e^{p_k t} + U_{\text{вх}} \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)} e^{j\omega t}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{\text{ввых}}(t) = U_{\text{вх}} e^{j\omega t} \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)}$$

## Связь передаточной функции и частотных характеристик

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вх}} e^{j\omega t} \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)} = U_{\text{вх}} e^{j\omega t} K(j\omega)$$

$$K(j\omega) = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)} U_{\text{вх}} e^{j\omega t}$$

$K(j\omega) = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$  – амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ)

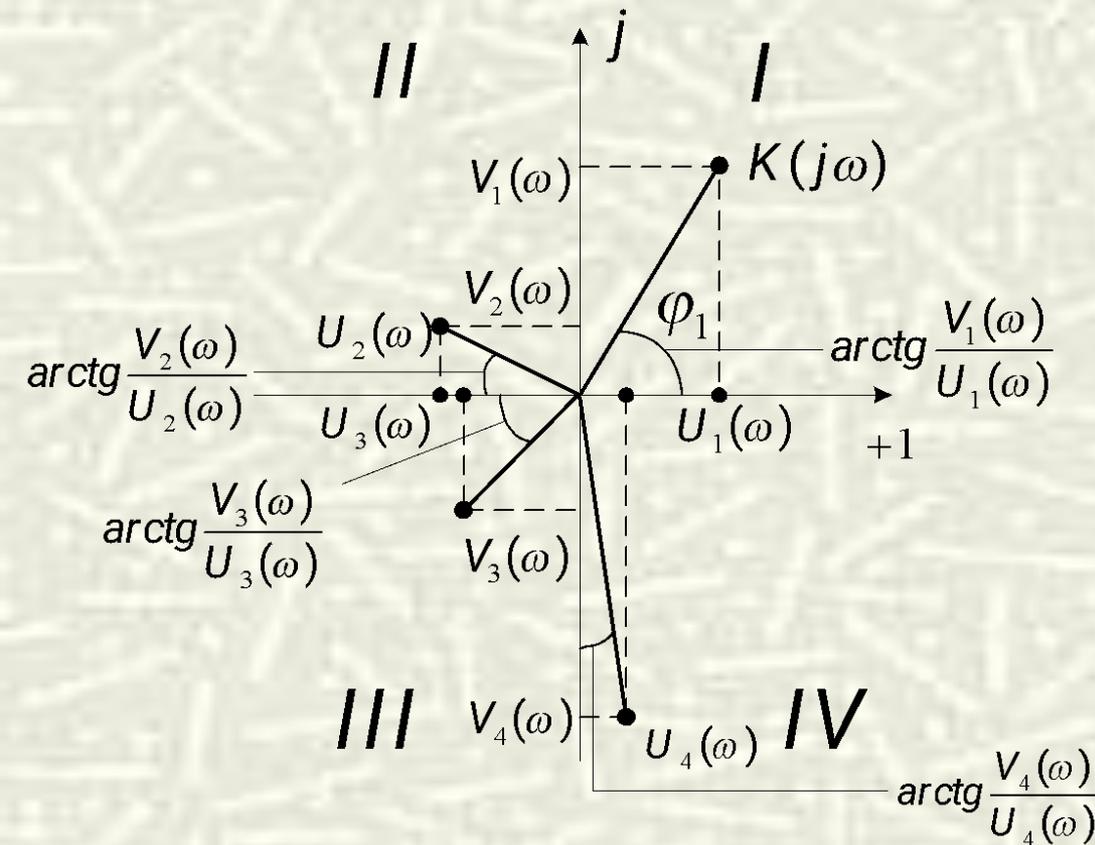
$$K(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$$

$U(\omega)$  – вещественная частотная характеристика,

$V(\omega)$  – мнимая частотная характеристика.

# Методы и средства цифровой обработки информации

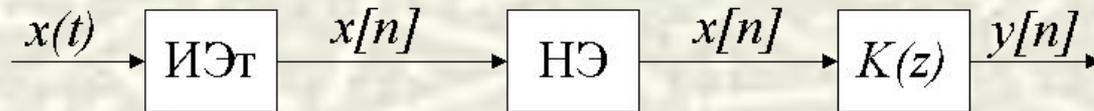
## Связь передаточной функции и частотных характеристик



$$K(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$$

$$\varphi(\omega) = \text{Arg } K(j\omega) = \begin{cases} \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)} + 2k\pi, & (I \text{ и } IV \text{ квадранты}), \\ \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)} + (2k+1)\pi & (II \text{ и } III \text{ квадранты}), \end{cases}$$

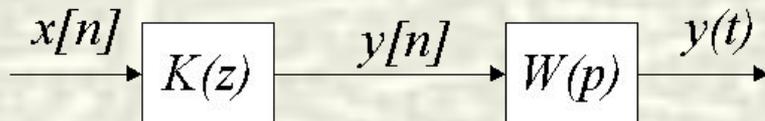
# Методы и средства цифровой обработки информации



временная дискретизация      квантование по уровню

АЦП

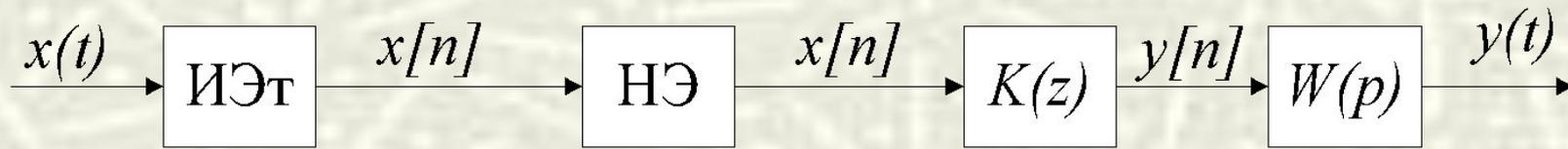
Графическое представление процесса преобразования аналогового сигнала в цифровой



Восстанавливающий оператор - ЦАП

Графическое представление процесса преобразования цифрового сигнала в аналоговый

# Методы и средства цифровой обработки информации



временная  
дискретизация

квантование по  
уровню

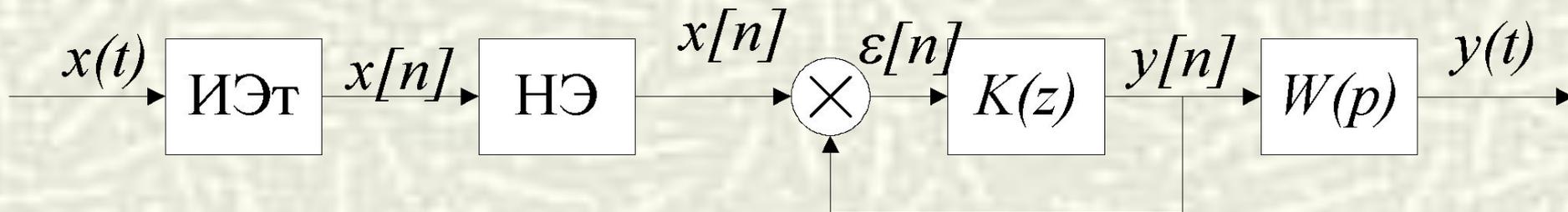
Восстанавливающий  
оператор - ЦАП

АЦП

Аналоговый вход - цифровая середина - аналоговый выход

# Методы и средства цифровой обработки информации

## Замкнутые системы



# Методы и средства цифровой обработки информации

