

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования

«Южно-Уральский государственный университет»

**Кафедра «Приборостроение»**

# Точность измерительных устройств

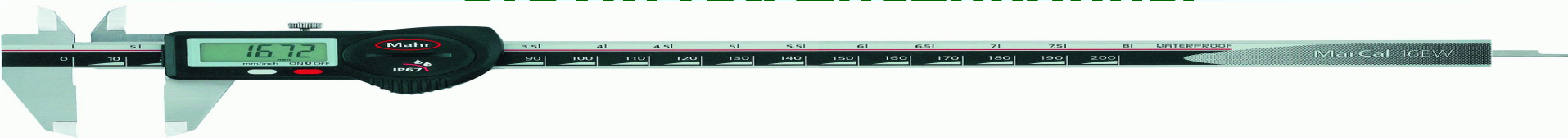
*Лекции*

© Слепова С.В., к.т.н., доцент

© Лысова А.А., ведущий программист

**2010**

# Структура дисциплины



**8 семестр**

**Лекции –30  
ч.**

**Семестровое  
задание**

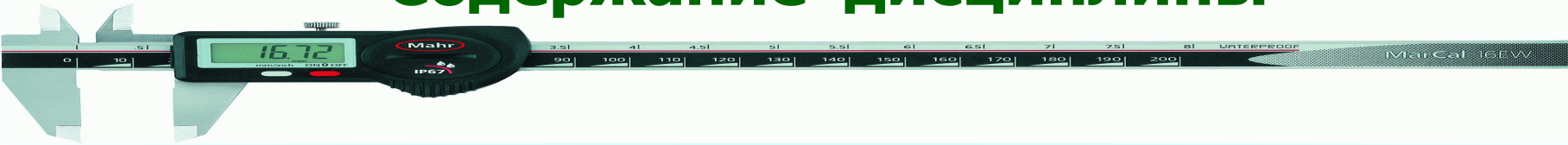
**Реферат**

**Зачет**



1. Слепова, С.В. Основы теории точности измерительных приборов: учебное пособие / С.В. Слепова. – Челябинск: ЮУрГУ, 2008.
2. Боднер, В.А. Измерительные приборы: учебник для вузов: в 2 т. Т. 1: Теория измерительных приборов. Измерительные преобразователи / В.А. Боднер, А.В. Алферов. – М.: Изд-во стандартов, 1986.
3. Подмастерьев, К.В. Точность измерительных устройств: учебное пособие / К.В. Подмастерьев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Орел: ОрелГТУ, 2004.
4. Иванцов, А.И. Основы теории точности измерительных устройств: учебное пособие для вузов / А.И. Иванцов. – М.: Изд-во стандартов, 1972.
5. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991.
6. ГОСТ 8.401–80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования.

# Содержание дисциплины



- Тема 1.** Общая характеристика измерительных приборов и систем.
- Тема 2.** Погрешности измерительных приборов.
- Тема 2\*(доп.).** Естественные пределы измерений.
- Тема 3.** Расчет методических погрешностей.
- Тема 4.** Инструментальные погрешности и методы их расчета.
- Тема 5.** Вероятностные характеристики погрешностей.
- Тема 6.** Расчет динамических погрешностей.
- Тема 7.** Суммирование составляющих результирующей погрешности.
- Тема 8.** Методы повышения точности.
- Тема 9.** Синтез характеристик измерительных приборов.
- Тема 10.** Оценка влияния производственно-технических погрешностей на реакции гидродинамического подвеса миниатюрного шарового гироскопа.

# Точность измерительных приборов

## Лекция 1

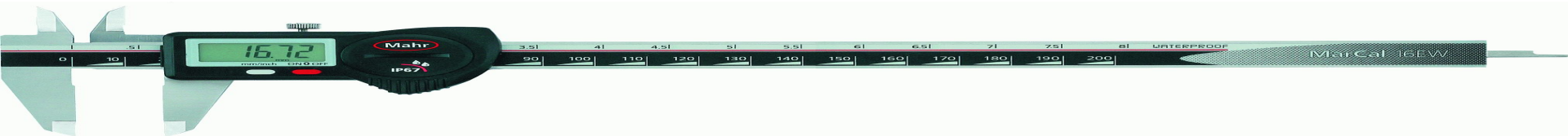
### Общая характеристика измерительных приборов и систем



© Слепова С.В., к.т.н., доцент

© Лысова А.А., ведущий программист

# Тема 1. Общая характеристика измерительных приборов и систем

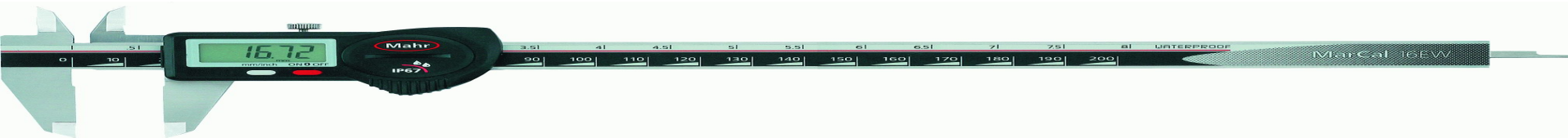


## Учебные вопросы

1.1. Основные понятия и определения

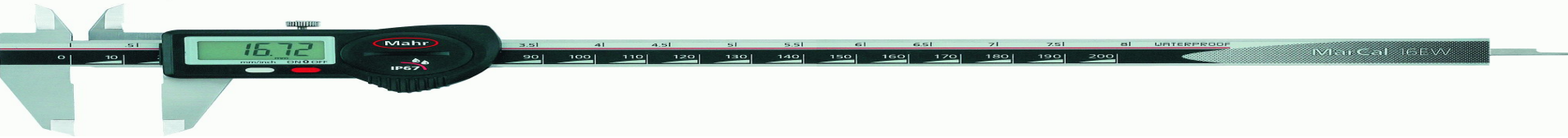
1.2. Основные характеристики измерительных приборов

# 1.1. Основные понятия и определения



\*

# 1.1. Основные понятия и определения

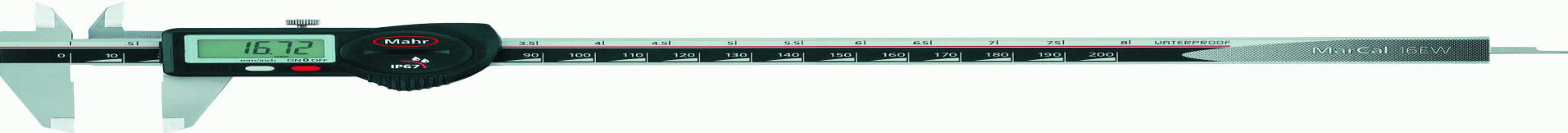


Получение информации о состоянии различных процессов и параметров с помощью измерительных устройств приобретает все большее значение во многих областях человеческой деятельности: промышленном производстве, авиации и космонавтике, экологическом мониторинге окружающей среды, медицине и других. При этом важную роль играет точность измерения, которая непосредственно зависит от точности измерительного устройства, являющегося средством получения информации о контролируемом процессе.

Точность измерительного устройства характеризует степень близости действительной функции преобразования сигнала к требуемой. Обеспечение необходимой точности является комплексной проблемой, решение которой осуществляется на всех этапах жизненного цикла изделия: проектирование, производство, техническое обслуживание и ремонт в процессе эксплуатации.



# 1.1. Основные понятия и определения



Основные задачи, возникающие при проектировании измерительного устройства (ИУ) :

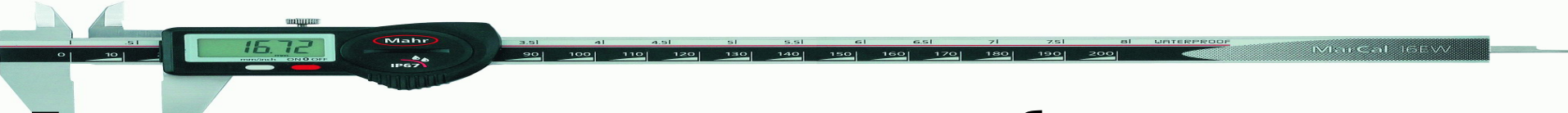
- **анализ точности ИУ;**
- **синтез ИУ;**
- **задача компенсации погрешностей.**

В **задаче анализа** определяются количественные оценки точности при выбранной схеме и конструкции измерительного устройства в статическом и динамическом режимах его работы. Данная задача сводится к суммированию влияния отдельных составляющих погрешности и к расчету результирующей погрешности изделия.

**Задача синтеза** заключается в оптимизации схемы и параметров объекта по различным частным и комплексным критериям, характеризующим точность.

**Для повышения точности и уменьшения погрешности** измерительного устройства используются структурные и алгоритмические методы, а также методы, основанные на оптимальной обработке избыточной информации.

# 1.1. Основные понятия и определения

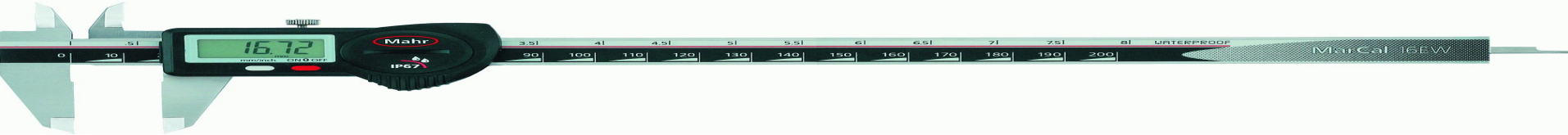


**Процесс проектирования включает в себя несколько циклов решения задач анализа и синтеза.**

На основе **синтеза** принимаются решения, с помощью **анализа** проверяется их эффективность, после чего вновь проводят синтез. И так до получения требуемого результата. На стадии **проектирования** предъявляются требования к точности изготовления измерительного устройства, которые реализуются на этапе **производства** в реальном технологическом процессе. Достижение заданной точности в процессе **эксплуатации** зависит от правильного выбора измерительного устройства в соответствии с его метрологическими характеристиками, учета особенностей контролируемого объекта и влияния эксплуатационных факторов на погрешность. Для поддержания необходимого уровня точности проводятся систематические поверки, текущие и капитальный ремонты используемого устройства.

В данном курсе рассматриваются вопросы обеспечения требуемой точности измерительных приборов на этапе их **проектирования**. Излагаются общие подходы и методы расчета точности, позволяющие оценивать погрешности объекта проектирования независимо от принципа его действия и конструктивных особенностей, пути повышения точности.

# 1.1. Основные понятия и определения



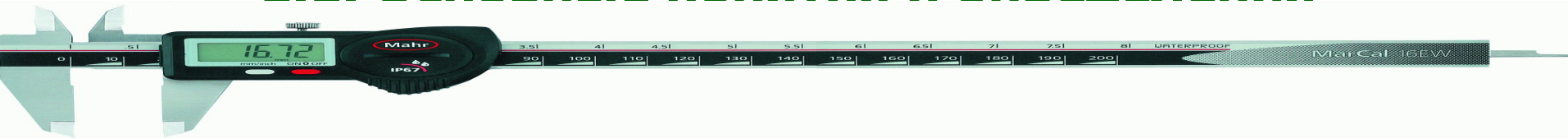
**Измерительная система** – это комплекс измерительных и вспомогательных устройств, обеспечивающих получение комплексной информации об исследуемом объекте.

Отличительные особенности измерительной системы:

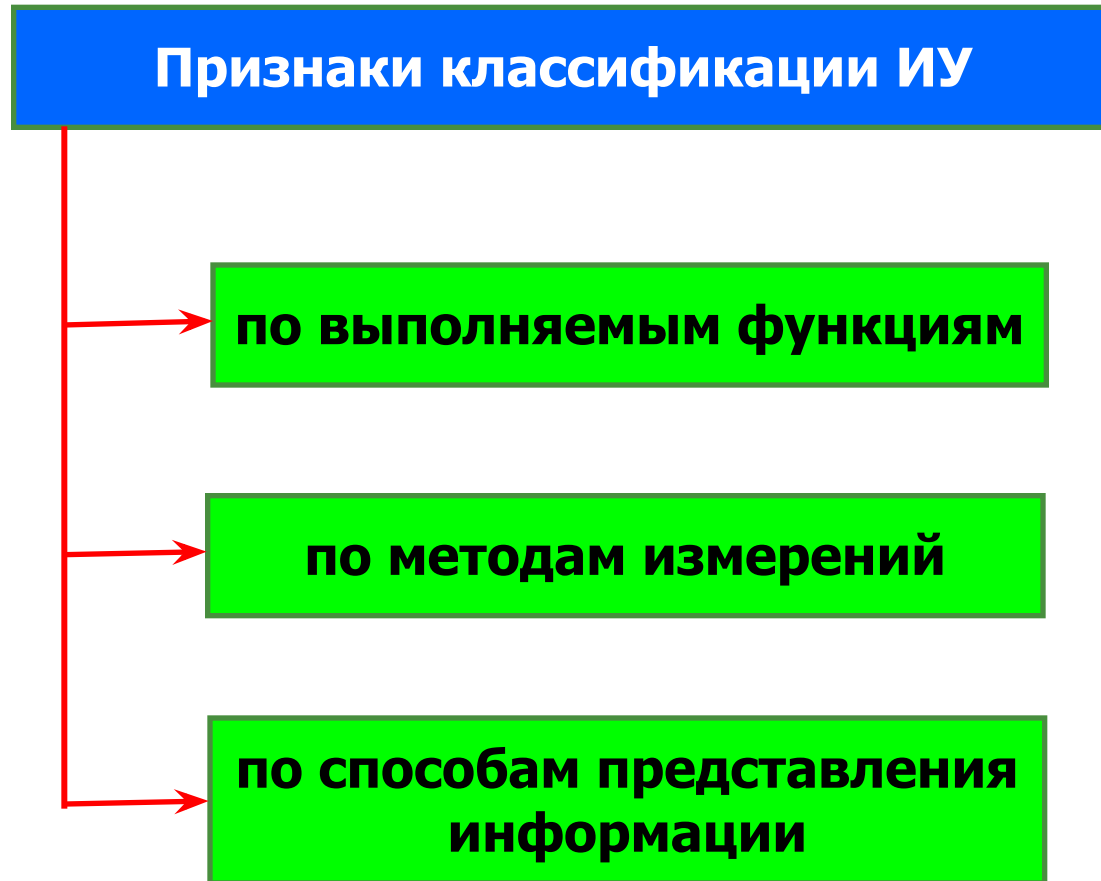
- одновременное измерение многих параметров объекта (многоканальность) и передача измерительной информации в единый центр;
- автоматизированное представление полученных данных в виде, наиболее удобном для последующей обработки получателем.

**Измерительные устройства** – это технические средства, с помощью которых измеряются различные физические величины.

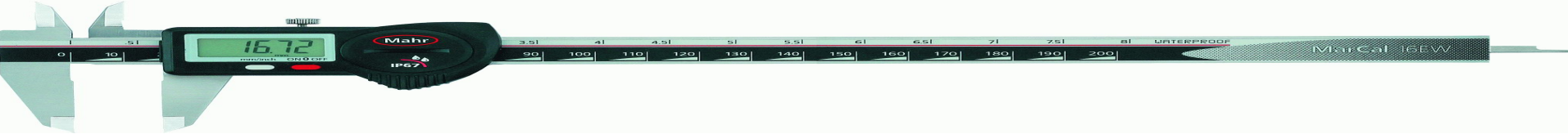
# 1.1. Основные понятия и определения



## Классификация измерительных устройств (ИУ)



# 1.1. Основные понятия и определения



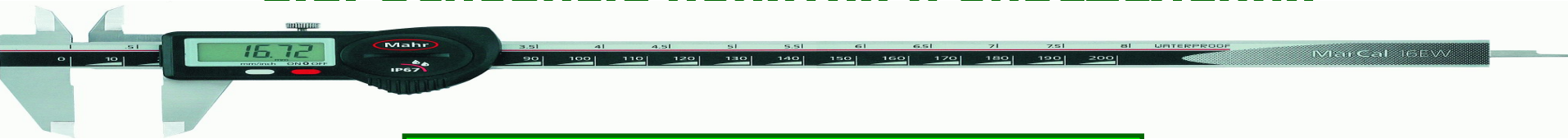
По выполняемым функциям

измерительные приборы

измерительные преобразователи (датчики)

- **Измерительные приборы** предназначены для выработки сигналов измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Например, измерительные приборы с визуальным отсчетом показаний, в которых выходным сигналом служит перемещение стрелки или цифровая индикация.
- В **измерительных преобразователях (датчиках)** выходной сигнал воспроизводится в виде некоторой физической величины (электрической, механической и др.), непосредственно воздействующей, минуя человека, на последующие устройства переработки информации в системе контроля или автоматического управления.

# 1.1. Основные понятия и определения



## По методам измерения

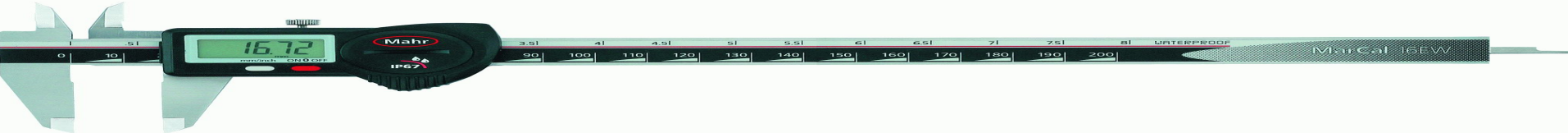
ИУ, осуществляющие  
прямые измерения

ИУ, осуществляющие  
косвенные измерения

- При **прямых измерениях** искомое значение измеряемой величины определяют путем непосредственного ее сравнения с мерами или показаниями прибора, проградуированного в принятых единицах измерения.
- При **косвенных измерениях** искомое значение измеряемой величины  $y$  находится по результатам прямых промежуточных измерений одной или нескольких величин  $x_1, \dots, x_n$ , связанных с искомой величиной определенной функциональной зависимостью

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

# 1.1. Основные понятия и определения



**Примером косвенного измерения** служит определение истинной воздушной скорости  $V$  самолета по результатам прямого измерения параметров встречного потока воздуха. Измерительный прибор в данном случае состоит из трех датчиков, измеряющих полное  $p_{\Pi}$  и статическое  $p_{\text{ст}}$  давление встречного потока воздуха, температуру  $T$  невозмущенной атмосферы на данной высоте, и вычислительной схемы, в соответствии с которой автоматически определяется величина скорости  $V$  по формуле

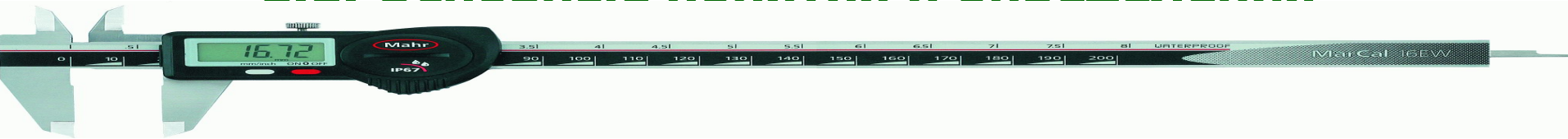
$$V = V(p_{\Pi}, p_{\text{ст}}, T) = \sqrt{2gRT \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_{\Pi}}{p_{\text{ст}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]},$$

где  $R$  – газовая постоянная ( $R = 29,27 \text{ м/}^{\circ}\text{C}$ );

$k$  – постоянная адиабаты ( $k = 1,4$ );

$g$  – гравитационное ускорение.

# 1.1. Основные понятия и определения



**По способам представления информации**

**аналоговые ИУ**

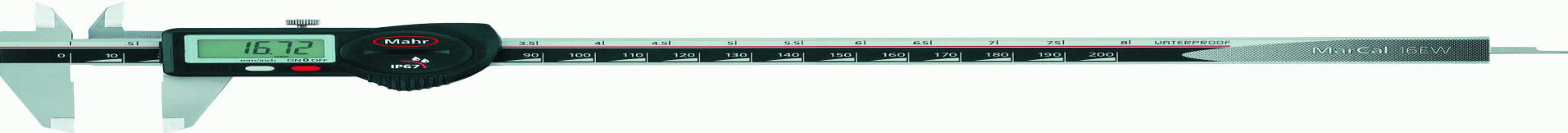
**дискретные ИУ**

В **аналоговых ИУ** входной сигнал связан с измеряемой величиной непрерывной функциональной зависимостью; мерой измеряемой величины служит уровень выходного сигнала.

В **дискретных ИУ** выходной сигнал измеряется скачкообразно; мерой измеряемой величины может служить накопленное число импульсов выходного сигнала, закодированная комбинация нескольких выходных сигналов и др.

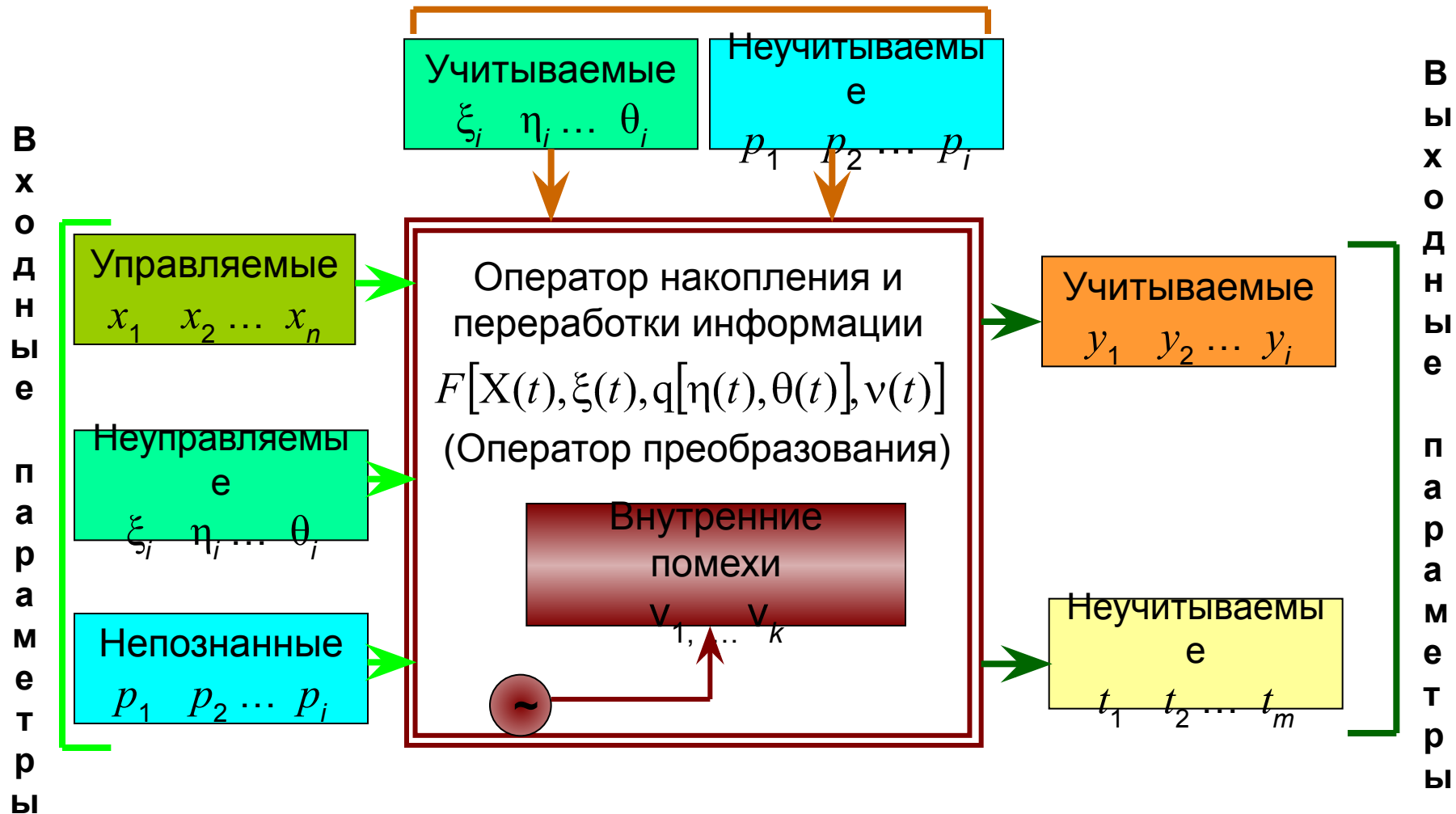


# 1.1. Основные понятия и определения

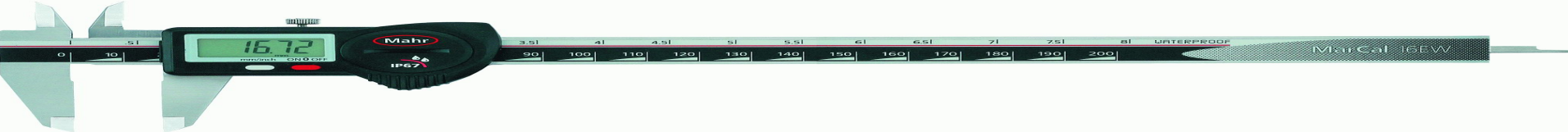


## Обобщенная схема измерительной системы

Возмущения



# 1.1. Основные понятия и определения



Оператор накопления и переработки информации (оператор преобразования) может быть реализован либо в виде динамической системы, либо в виде некоторого алгоритма.

Часть измерительной схемы, осуществляющая определенное преобразование измерительной информации по заданному закону, называется **функциональным преобразователем**. Функциональный преобразователь представляет собой структурное соединение некоторого количества элементов, обеспечивающее преобразование измерительной информации по заданному закону.

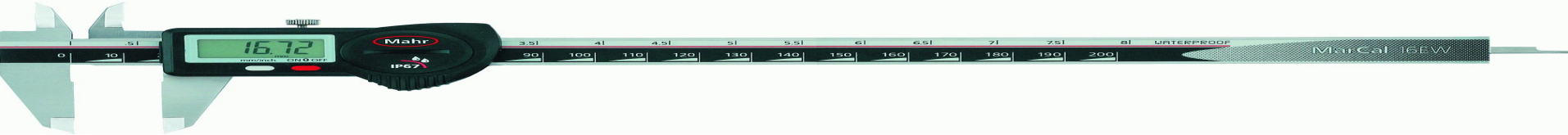
**Идеальной информационной моделью** измерительной системы называется зависимость вида

$$Y_o(t) = F[X(t)],$$

где  $X(t)$ ,  $Y_o(t)$  – матрицы-столбцы соответственно входного и выходного сигналов;

$F[.]$  – оператор преобразования, в качестве которого может быть функция или последовательность операций.

# 1.1. Основные понятия и определения



**Реальной информационной моделью** измерительной системы называется зависимость вида

$$Y(t) = F[X(t), \xi(t), q(\eta(t), \theta(t)), v(t)],$$

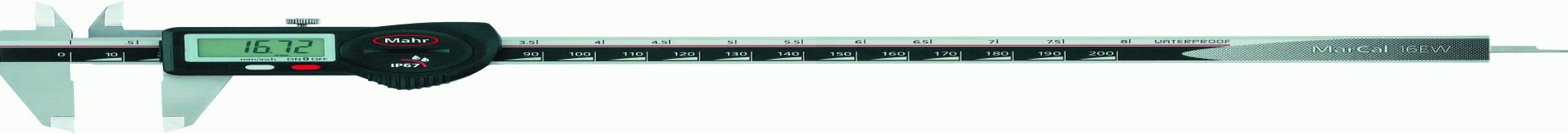
где  $X(t), Y(t)$  – матрицы-столбцы соответственно входного и выходного сигналов;

$\xi(t)$  – матрица-столбец возмущений входных сигналов;

$\eta(t), \theta(t)$  – матрицы-столбцы помех, действующих на параметры  $q$  из-за несовершенства конструкции и технологии изготовления;

$v(t)$  – матрица-столбец внутренних помех, возникающих внутри системы: влияние трения, температуры, магнитных и электрических полей.

# 1.1. Основные понятия и определения



**Измеряемые величины**, на основе которых формируются входные сигналы  $X(t)$  – это, например, давление, температура, количество и расход жидкости, деформации, вибрации и др.

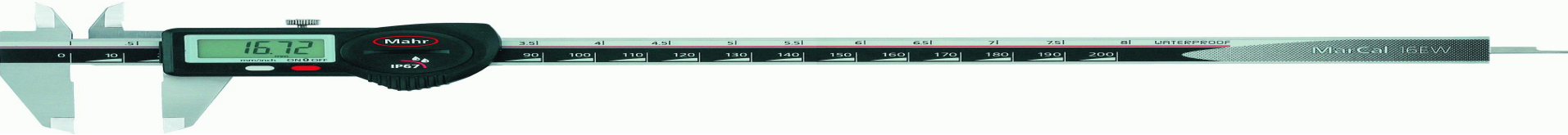
**Вредные возмущения** – это перегрузки, вибрации, электрические, магнитные поля, случайные изменения температуры, давления, влажности окружающей среды и т. п.

Измерительная система должна воспроизводить измеряемые величины с допустимыми погрешностями, т. е. генерировать на своем выходе величины, пропорциональные входным величинам с достаточной точностью.

**Первичные сигналы**, воспринимаемые чувствительными элементами, чаще всего преобразуются в электрические сигналы, которые удобны для передачи и обработки.

Часть измерительной системы, в которой первичные сигналы преобразуются в электрические, называется **первичным преобразователем**.

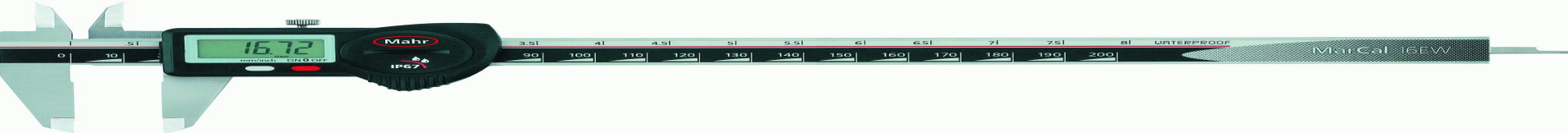
# 1.1. Основные понятия и определения



**Статическим режимом** измерения называется такой, при котором скорость изменения измеряемой величины значительно меньше (на порядок и более) скорости «собственного движения» (времени переходного процесса) измерительной системы.

**Динамическим режимом** измерения называется такой, при котором скорость изменения измеряемой величины сравнима со скоростью «собственного движения» (временем переходного процесса) измерительной системы.

# 1.1. Основные понятия и определения

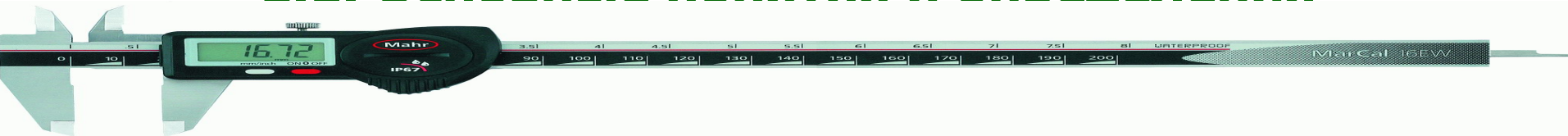


## Структурная схема измерительного прибора.

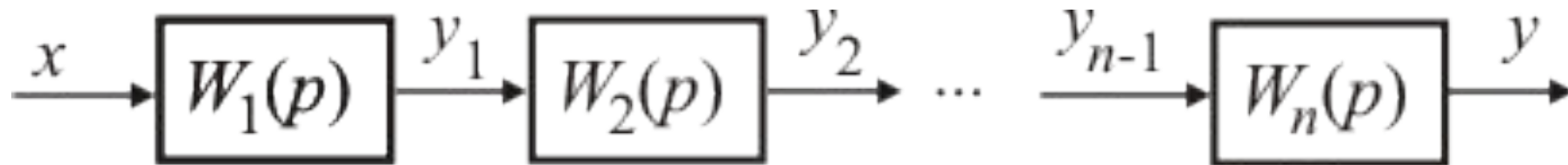
В большинстве измерительных приборов преобразование сигналов является многоступенчатым: измеряемая величина  $x$ , прежде чем она преобразуется в выходной сигнал  $y$ , претерпевает промежуточные преобразования, осуществляемые с помощью измерительных звеньев, отображаемых на структурной схеме в виде **элементарных преобразователей физических величин**. Внутри прямоугольника, условно изображающего звено, записывается его функциональное назначение или передаточная функция.

Таким образом, структурная схема прибора отображает совокупность звеньев, осуществляющих элементарные преобразования информации, а также статические и динамические передаточные свойства. Соединение звеньев в схеме прибора может быть **последовательным, параллельным, встречно-параллельным**.

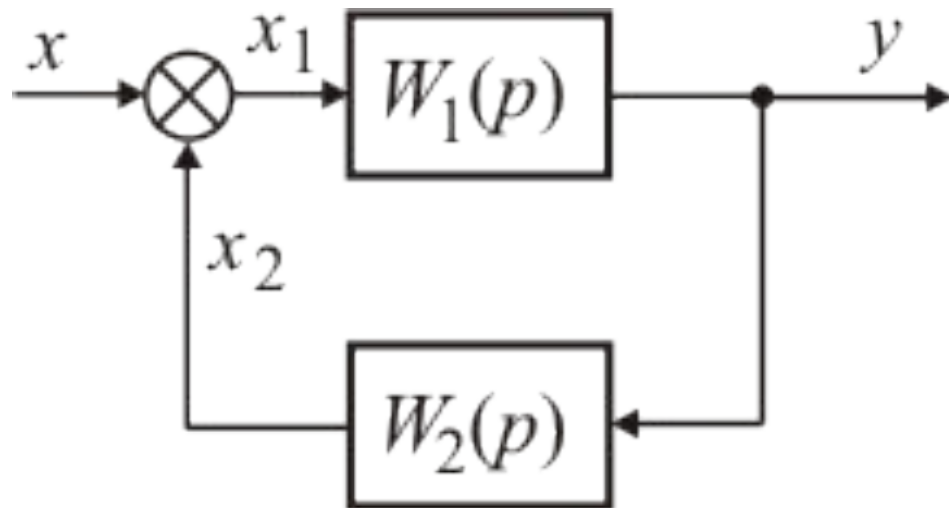
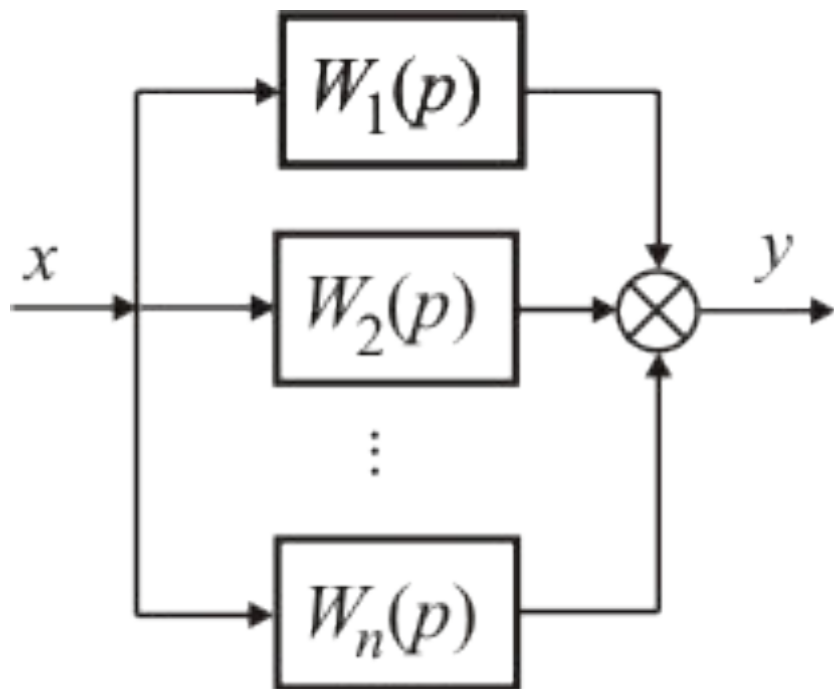
# 1.1. Основные понятия и определения



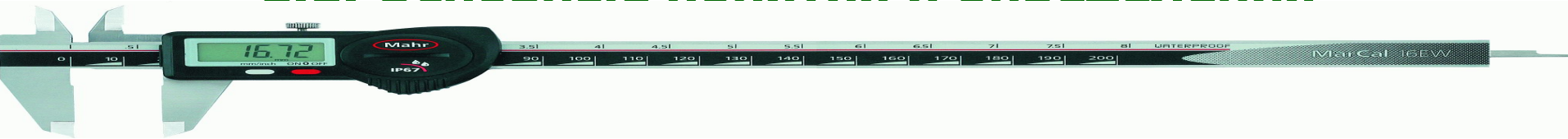
Схемы последовательного,



параллельного, встречно-параллельного соединения звеньев



# 1.1. Основные понятия и определения



В измерительном приборе могут присутствовать различные виды соединения звеньев:

- основным видом соединения является **последовательное**, обеспечивающее заданный закон преобразования сигнала;
- **параллельное** соединение применяется для резервирования или комплексирования;
- **встречно-параллельное** – для создания устройств с обратной связью.

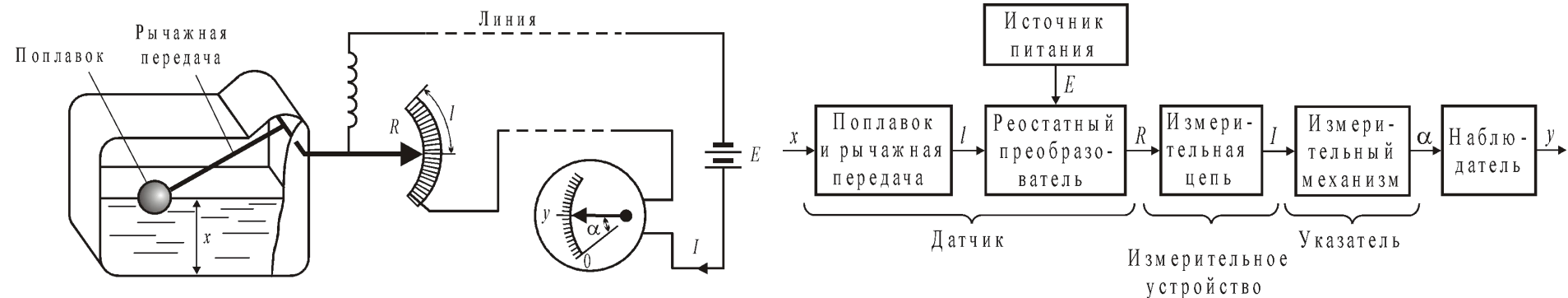
Последние два вида соединений используют, как правило, для обеспечения стабильности характеристик измерительных приборов, повышения их точности и надежности.



# 1.1. Основные понятия и определения



## Пример 1. Электрический прибор для измерения уровня жидкости в ёмкости

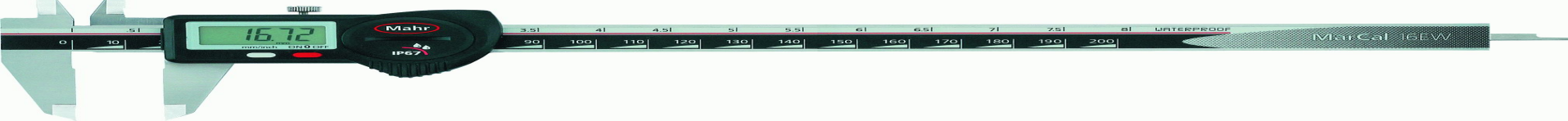


**Принцип действия.** Высота измеряемого уровня  $x$  воспринимается поплавком, который с помощью рычажной передачи перемещает движок реостата  $R$ . Эта часть устройства обеспечивает однозначную функциональную зависимость перемещения  $l$  от измеряемой величины  $x$ . Реостат с равномерной намоткой (реостатный измерительный преобразователь) дает однозначную зависимость  $R = \phi(l)$ . Электрическая измерительная цепь (при постоянстве напряжения  $E$  источника питания и всех сопротивлений цепи, кроме сопротивления реостата) осуществляет однозначную зависимость тока  $I$  от сопротивления  $R$ . Поэтому шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в значениях измеряемого уровня.

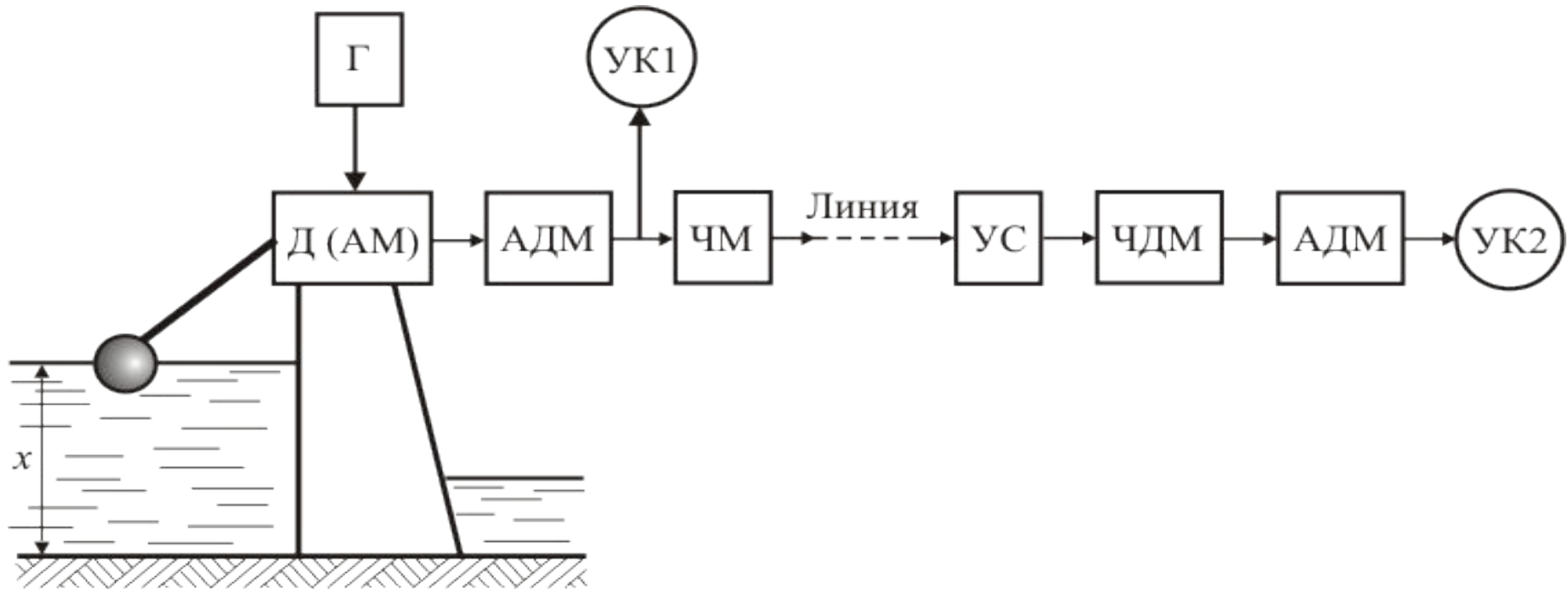
Измерительные преобразования, используемые в уровнемере:

$$x \rightarrow l \rightarrow R \rightarrow I \rightarrow \alpha \rightarrow y.$$

Преобразование  $\alpha \rightarrow y$  есть снятие отсчета и регистрация показаний.

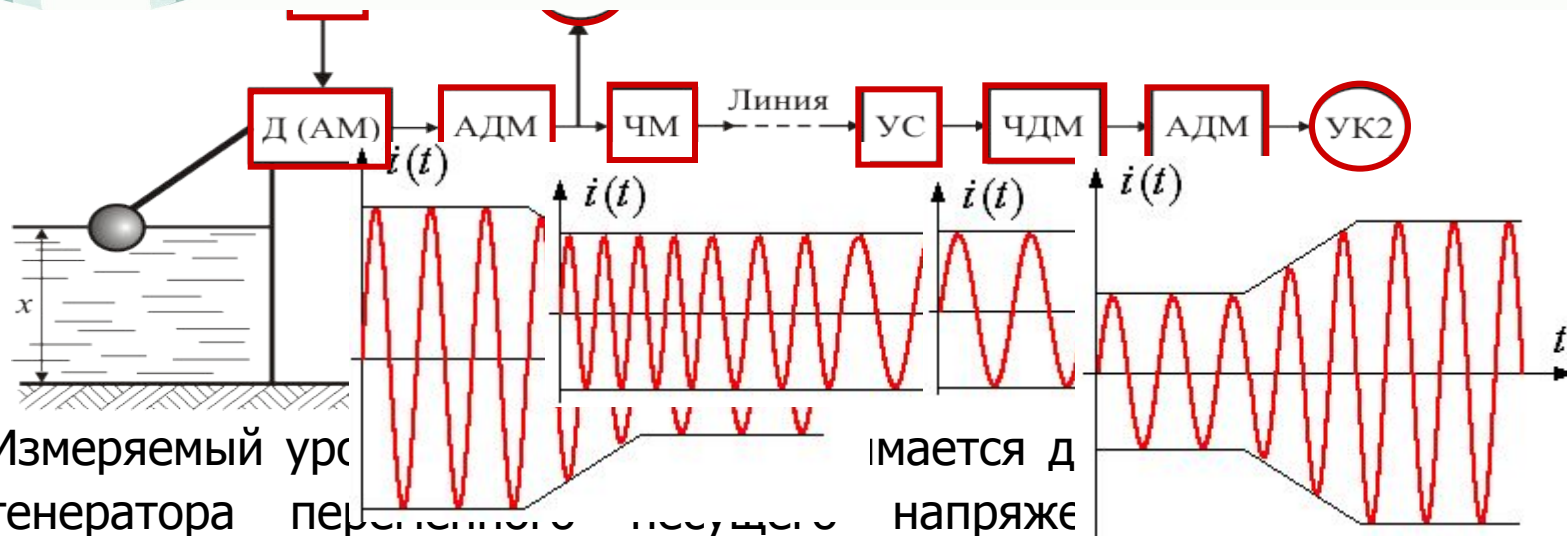
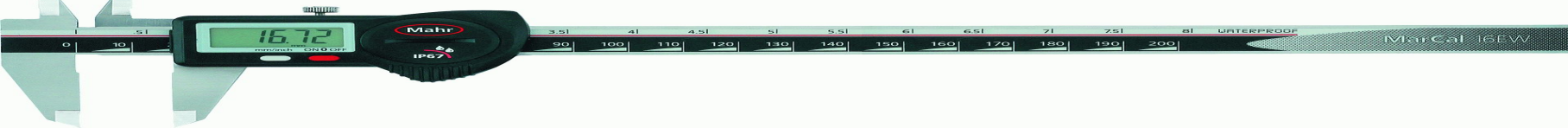


**Пример 2.** Структурная схема измерения уровня воды в водохранилище гидроэлектростанции



Измеряемой величиной является уровень воды  $x$  в водохранилище гидроэлектростанции; показания измерительного устройства необходимо передавать на пульт центральной диспетчерской, расположенной, например, в областной администрации.

# 1.1 Основные понятия и определения



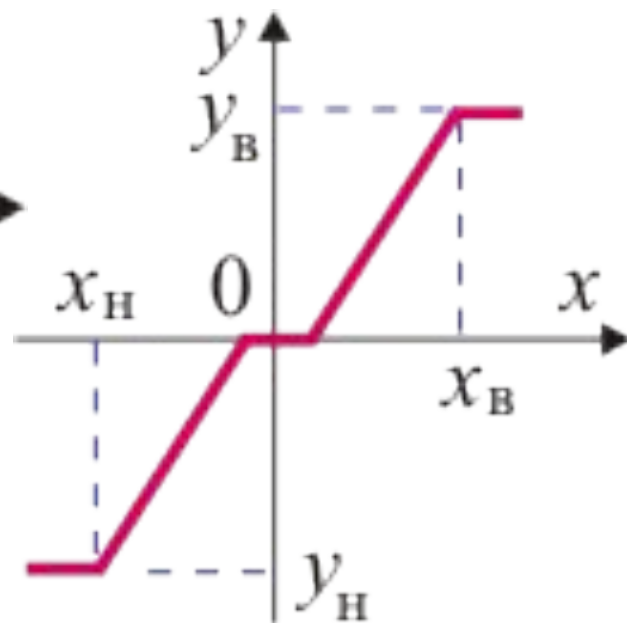
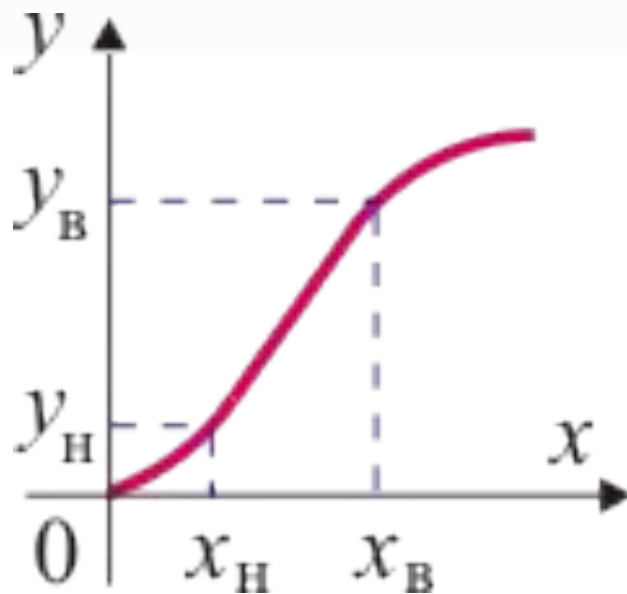
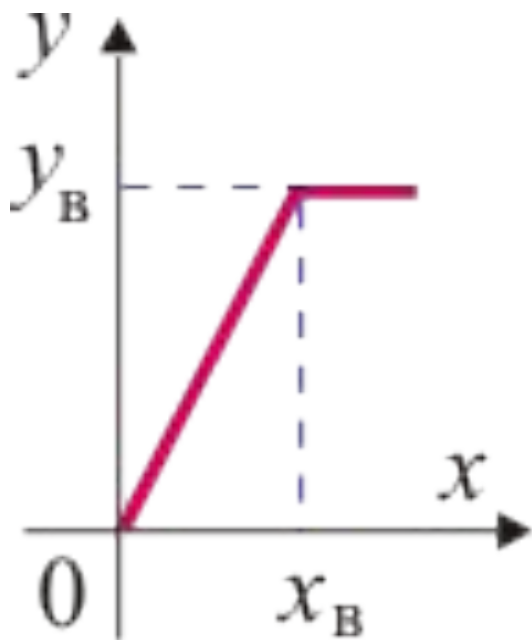
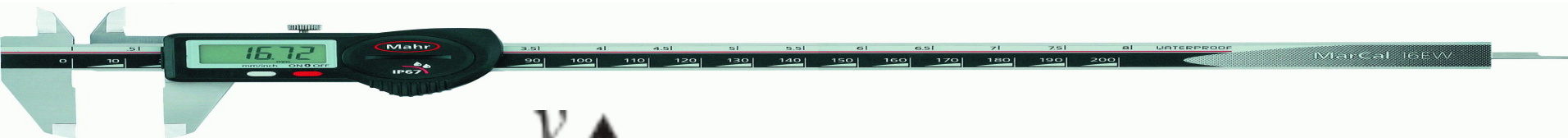
Измеряемый уровень воды в резервуаре передается от генератора переменного тока к передатчику, который модулируется амплитудным модулятором АМ, моделирующим по амплитуде переменный несущий ток, в результате чего ток изменяется по времени.

Затем этот ток поступает в амплитудный демодулятор АДМ.

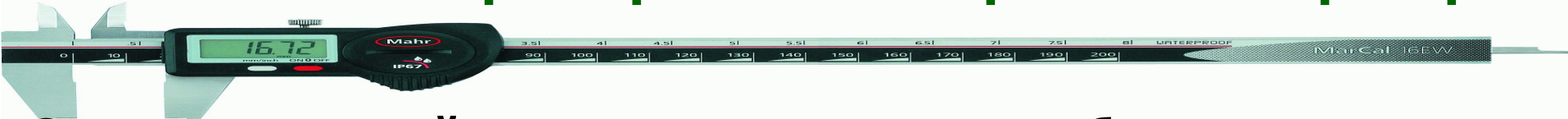
На выходе АДМ включен местный указатель УК1, находящийся на пульте управления электростанции, и параллельно частотный модулятор ЧМ, на выходе которого получается ток, показанный на рисунке.

Этот ток, промодулированный по частоте, по линии связи направляется в центральную диспетчерскую, где усиливается усилителем УС и поступает сначала в частотный демодулятор ЧДМ, где его кривая получает указанный вид, а затем в амплитудный демодулятор АДМ и, наконец, на указатель УК2, стоящий на пульте в центральной диспетчерской.

# 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



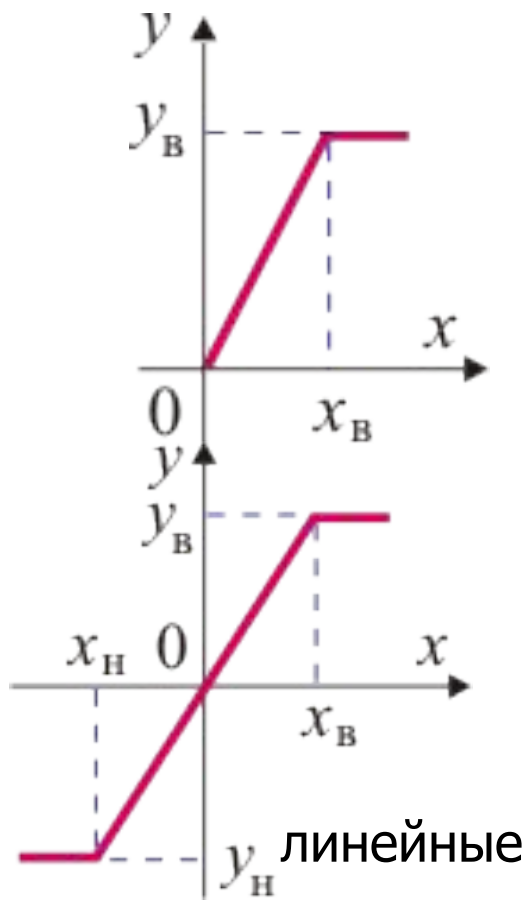
# 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



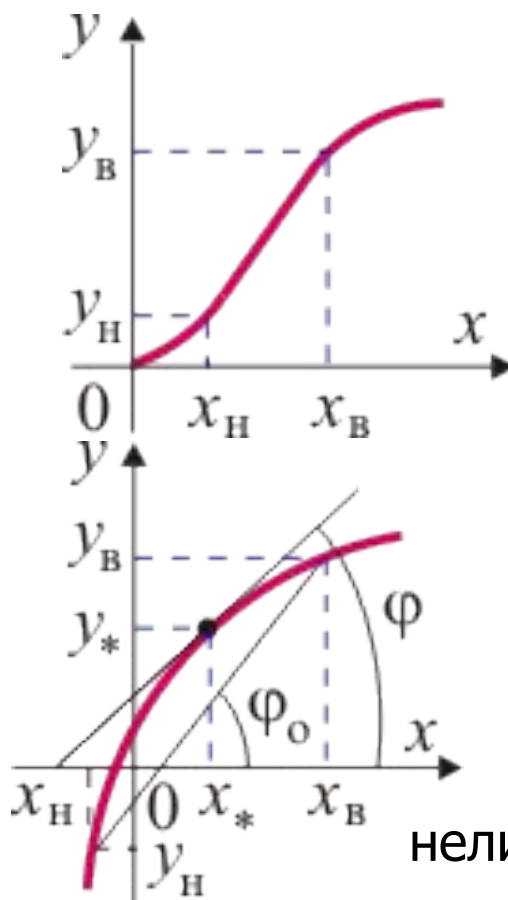
Статические свойства измерительных приборов описываются **статической характеристикой**, представляющей собой функциональную зависимость между установившимися значениями измеряемой величины  $x$  и выходного сигнала  $y$  :

$$y = F(x).$$

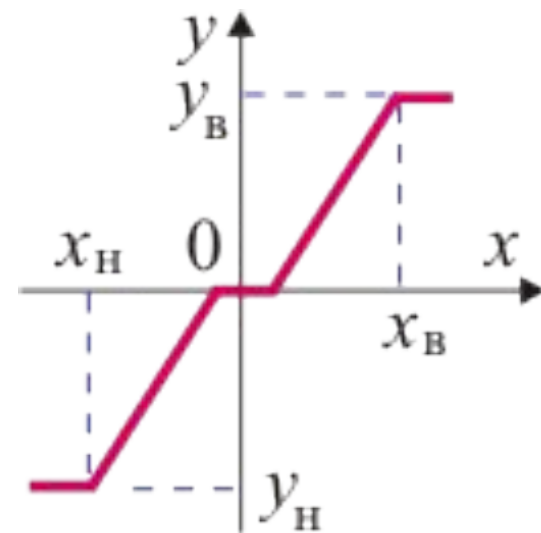
Наиболее характерные виды статических характеристик:



линейные

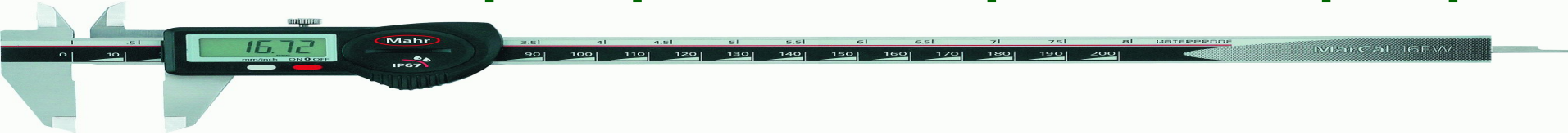


нелинейные



линейная с зоной нечувствительности

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



При составлении математического описания прибора необходимо различать его заданную, расчетную и экспериментальную статические характеристики.

**Заданная (требуемая) характеристика** – это функциональная зависимость между  $x$  и  $y$ , приведенная в технических требованиях или в техническом задании на проектирование измерительного прибора:

$$y_o = F_o(x).$$

Соответствует идеальной информационной модели

$$Y_o(t) = F[X(t)].$$

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



**Расчетная (теоретическая) характеристика** – полученное расчетным путем уравнение, выражающее функциональную зависимость  $y$  не только от входного сигнала  $x$ , но и от внутренних параметров и дестабилизирующих факторов, внешних возмущающих воздействий:

$$y_p = F_p[x, \xi, \mathbf{q}(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\theta}), \mathbf{v}].$$

Соответствует реальной информационной модели

$$\mathbf{Y}(t) = F[\mathbf{X}(t), \xi(t), \mathbf{q}(\boldsymbol{\eta}(t), \boldsymbol{\theta}(t)), \mathbf{v}(t)].$$

Если в качестве внутренних параметров используются их номинальные значения, а значения дестабилизирующих факторов и возмущающих воздействий приравниваются нулю, то в этом случае получается **номинальная расчетная характеристика**.

Расчетная характеристика является основой математического моделирования измерительного прибора на этапе проектирования. Она необходима для проведения анализа и синтеза прибора по точностным критериям.

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



**Индивидуальная (экспериментальная, градуировочная) характеристика** – зависимость выходного сигнала  $y$  от  $x$  для конкретного экземпляра устройства, когда все внутренние параметры принимают свои действительные значения:

$$y_{\text{инд}} = F_{\text{инд}}(x).$$

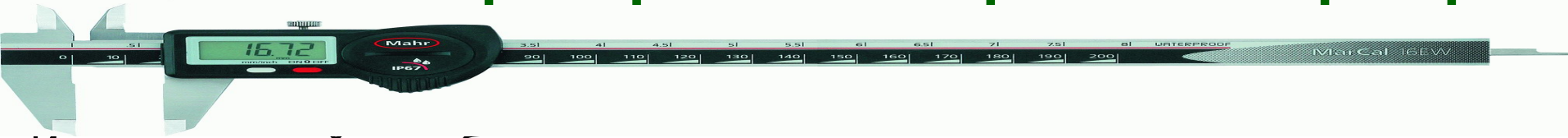
При проектировании стремятся выполнить условие

$$F_{\text{инд}}(x) = F_o(x),$$

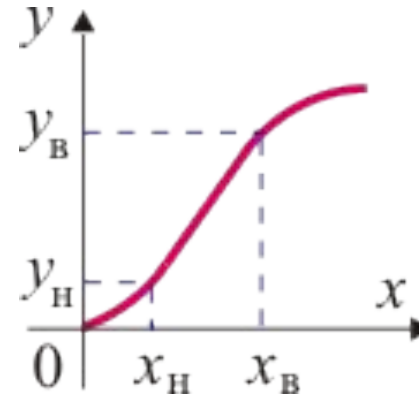
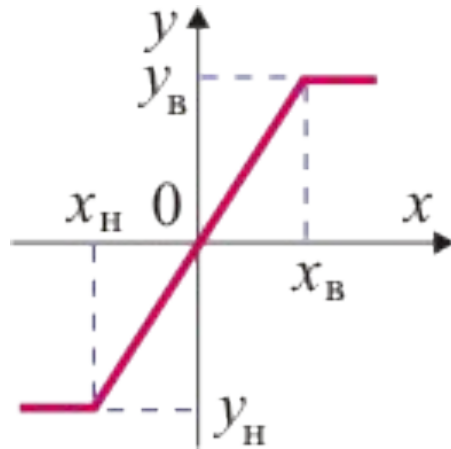
обеспечивающее отсутствие погрешности измерительного прибора.



## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



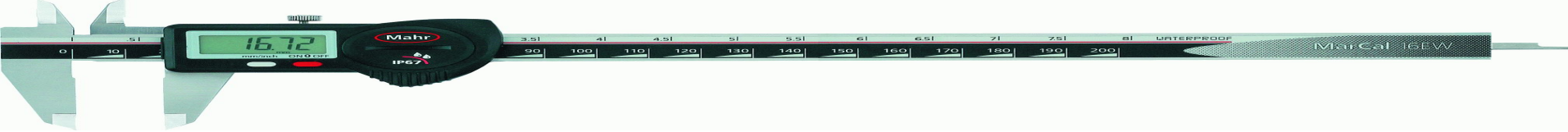
Измерительный прибор характеризуется нижним  $x_H$  и верхним  $x_B$  значениями измеряемой величины. Им соответствуют нижнее  $y_H$  и верхнее  $y_B$  значения выходного сигнала, представляющего собой значение новой физической величины, полученной после преобразования измеряемой физической величины.



**Диапазоны измерения входной и выходной величин** определяются соответствующими абсолютными разностями их нижнего и верхнего значений:

$$x_D = |x_B - x_H|; \quad y_D = |y_B - y_H|.$$

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



**Чувствительностью измерительного прибора** называется предел вида

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x},$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – приращения соответственно входного и выходного сигналов. Значение чувствительности показывает, какое изменение  $\Delta x$  входного сигнала необходимо, чтобы сигнал на выходе изменился на  $\Delta y$ .

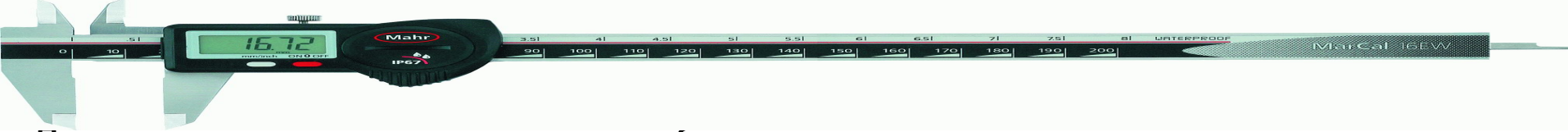
Если между входным и выходным сигналами имеется функциональная зависимость  $y = F(x)$ , то чувствительность определяется выражением

$$S = dF / dx.$$

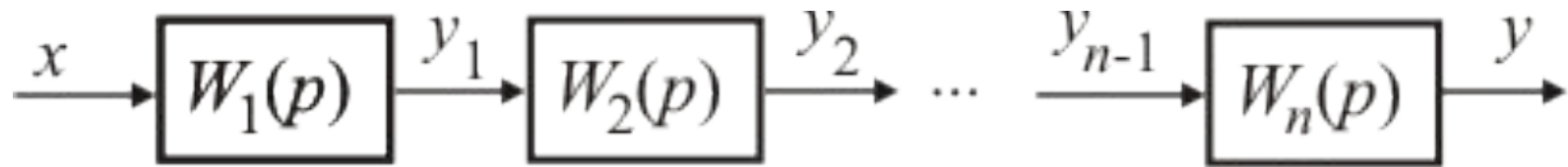
Если найдена передаточная функция  $W(p)$  измерительного прибора, то его чувствительность находится по формуле

$$S = W(0).$$

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



Для измерительного прибора, состоящего из нескольких **последовательно** соединенных элементарных преобразователей, характеристики элементарных звеньев имеют вид:



$$y_1 = f_1(x); \quad y_2 = f_2(y_1); \quad \dots; \quad y_n = f_n(y_{n-1}).$$

При этом **статическая характеристика** прибора записывается в виде

$$y = f_n \{ f_{n-1} \dots f_2 [ f_1(x) ] \}.$$

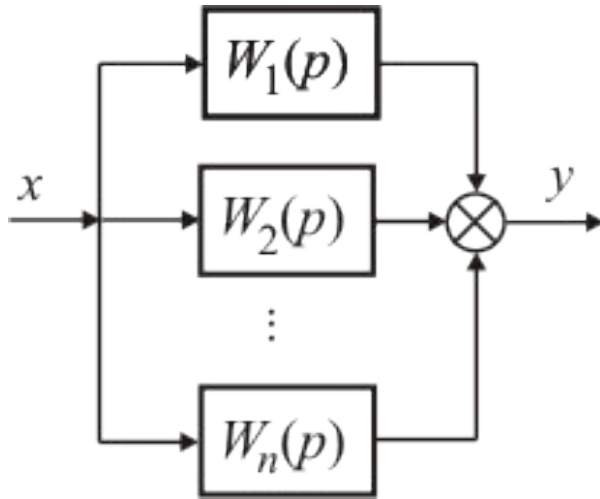
**Общая чувствительность** определяется произведением чувствительностей отдельных звеньев

$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{dy_1}{dx} \cdot \frac{dy_2}{dy_1} \cdot \frac{dy_3}{dy_2} \cdot \dots \cdot \frac{dy_n}{dy_{n-1}} = \prod_{i=1}^n S_i.$$

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



При **параллельном** соединении звеньев характеристики элементарных звеньев имеют вид:



$$y_1 = f_1(x);$$

$$y_2 = f_2(x);$$

...

$$y_n = f_n(x).$$

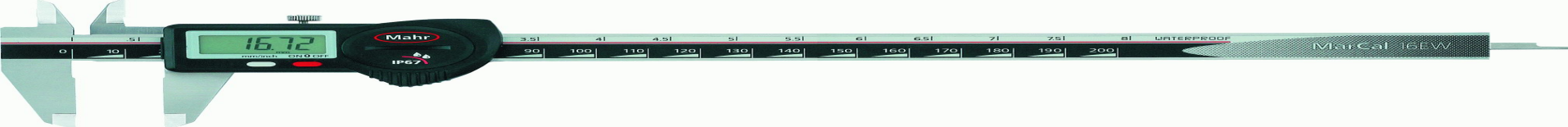
**Статическая характеристика** выходного сигнала равна сумме статических характеристик звеньев

$$y = f_1(x) + f_2(x) + \dots + f_n(x),$$

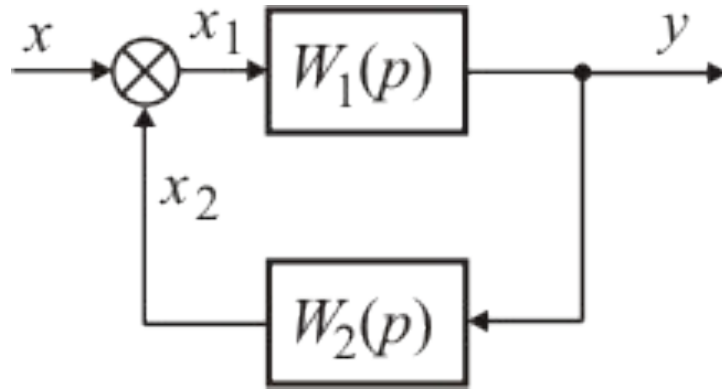
**Чувствительность всей цепи** при этом находится по формуле

$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{df_1(x)}{dx} + \frac{df_2(x)}{dx} + \dots + \frac{df_n(x)}{dx} = \sum_{i=1}^n S_i.$$

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



При **встречно-параллельном** соединении двух измерительных звеньев уравнения связи между параметрами имеют вид:



$$\begin{aligned}y &= f_1(x_1); \\x_2 &= f_2(y); \\x_1 &= x \pm x_2,\end{aligned}$$

где знак «+» соответствует положительной обратной связи, а знак «-» – отрицательной.

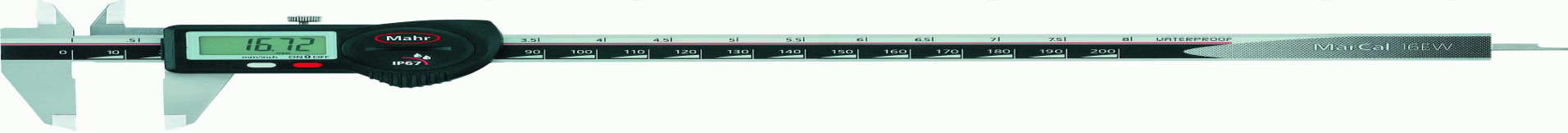
**Статическая характеристика** измерительного прибора в этом случае записывается в неявном виде

$$y = f_1(x \pm x_2).$$

**Чувствительность** рассматриваемой структурной схемы:

$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dx_1} \frac{dx_1}{dx} = \frac{dy}{dx_1} \left( \frac{dx}{dx} \pm \frac{dx_2}{dy} \frac{dy}{dx} \right) = S_1 \left( 1 \pm \frac{S}{S_2} \right).$$

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



Динамические свойства измерительных приборов описываются **динамическими характеристиками**.

Динамические характеристики по признаку полноты описания свойств разделяют на **полные** и **частные**.

**Полные динамические характеристики** однозначно определяют изменение выходного сигнала  $y(t)$  измерительного прибора при любых изменениях во времени входного сигнала  $x(t)$  и влияющих величин.

К полным динамическим характеристикам относятся:

– **дифференциальное уравнение**

$$f_1(y^n, y^{n-1}, \dots, y, t) = f_2(x^m, x^{m-1}, \dots, x, t),$$

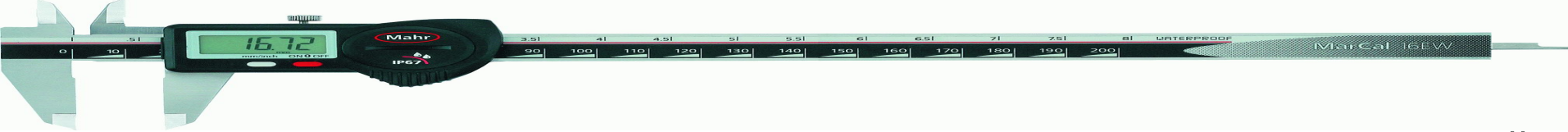
где  $n$  и  $m$  – соответственно порядок производных по времени выходного и входного сигналов;

– **импульсная переходная функция  $h(t)$** ;

– **передаточная функция  $W(p)$** ;

– **амплитудно-  $A(\omega)$  и фазочастотные  $\varphi(\omega)$  характеристики**.

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



**Частные динамические характеристики** представляют собой функционалы или параметры полных динамических характеристик измерительного прибора, например, постоянная времени, время запаздывания установления выходного параметра.

**Полные динамические характеристики однозначно взаимосвязаны между собой.** Достаточно рассчитать одну из них, чтобы путем математических преобразований получить другую. Наиболее широко применяются дифференциальное уравнение и передаточная функция.

Динамические характеристики систем можно свести к характеристикам нескольких типовых звеньев или их комбинаций.

Под **типовым динамическим звеном** понимается устройство любого физического принципа действия и конструктивного исполнения (механическое, электрическое, акустическое и др.), работа которого описывается определенным дифференциальным уравнением. К основным типовым динамическим звеньям относятся: усилительное, дифференцирующее, интегрирующее, инерционное колебательное и др.

## 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



**Передаточная функция**  $W(p)$  измерительного прибора, представляющего собой динамическую систему, составляется с учетом характера соединения ее элементарных звеньев

• при **последовательном** соединении: 
$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p);$$

• при **параллельном**: 
$$W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p);$$

• при **встречно-параллельном**: 
$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \boxtimes W_1(p)W_2(p)},$$

где  $W_1(p)$ ,  $W_2(p)$  – общие передаточные функции цепи прямого преобразования и цепи обратной связи соответственно.

• при **смешанном соединении** звеньев структурную схему измерительного прибора упрощают методом последовательных преобразований, заменяя группы звеньев с рассмотренными видами соединения на эквивалентные звенья.



# 1.2. Основные характеристики измерительных приборов



## Характеристики типовых динамических звеньев

Наименование звена	Дифференциальное уравнение	Передаточная функция	Примеры реализации типовых динамических звеньев
Усилительное	$y(t) = S \cdot x(t)$	$W(p) = S$	Усилители, делители тока и напряжения, мостовые схемы, рычажные, зубчатые и другие механические передачи
Дифференцирующее	$y(t) = S \frac{dx(t)}{dt}$	$W(p) = Sp$	Тахогенераторы, дифференцирующие $RC$ и $LC$ контуры, включенные в обратную связь операционного усилителя
Интегрирующее	$y(t) = S \int_0^t x(t) dt$	$W(p) = \frac{S}{p}$	Электродвигатели шаговой конструкции, реверсивные датчики, интегрирующие $RC$ и $LC$ контуры в цепях обратной связи
Инерционное	$T \frac{dy}{dt} + y = S \cdot x$	$W(p) = \frac{S}{1 + Tp}$	Чувствительные элементы многих приборов, пневматические, гидравлические элементы, электронные цепи типа $RC$ и $LC$
Реальное дифференцирующее	$T \frac{dy}{dt} + y = S \frac{dx}{dt}$	$W(p) = \frac{Sp}{1 + Tp}$	
Колебательное	$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2d \omega_o \frac{dy}{dt} + \omega_o^2 y = S \omega_o^2 x$	$W(p) = \frac{S \omega_o^2}{p^2 + 2d \omega_o p + \omega_o^2}$	Системы, содержащие квазиупругие, инерционные и диссипативные элементы, между которыми происходит обмен энергией. Электроизмерительные механизмы, электромеханические осциллографы, акселерометры, виброметры
Двигательное	$T \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = S \cdot x$	$W(p) = \frac{S}{p(1 + Tp)}$	В чистом виде практически не существует, используется для моделирования механических и электромеханических устройств (электро-, гидро-, пневмодвигатели), в которых угол поворота выходного звена является интегралом от входного напряжения