

## 1.3. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

- **Принцип измерений** – физическое явление или эффект, положенное в основу измерения.  
*Например, использование силы тяжести при измерении массы взвешиванием.*
- **Метод измерений** – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей или соотнесения со шкалой в соответствии с реализованным принципом измерений.

- ***метод непосредственной оценки*** – ЭТО МЕТОД, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений.

К таким средствам измерений относятся манометры, динамометры, амперметры, вольтметры, ваттметры, расходомеры, жидкостные термометры, штриховые меры длины (линейки, рулетки, измерительные скобы), взвешивание грузов на циферблатных весах и т.п.

- ***метод совпадений*** – ЭТО МЕТОД, характеризуемый применением совпадения отметок шкал или периодических сигналов.

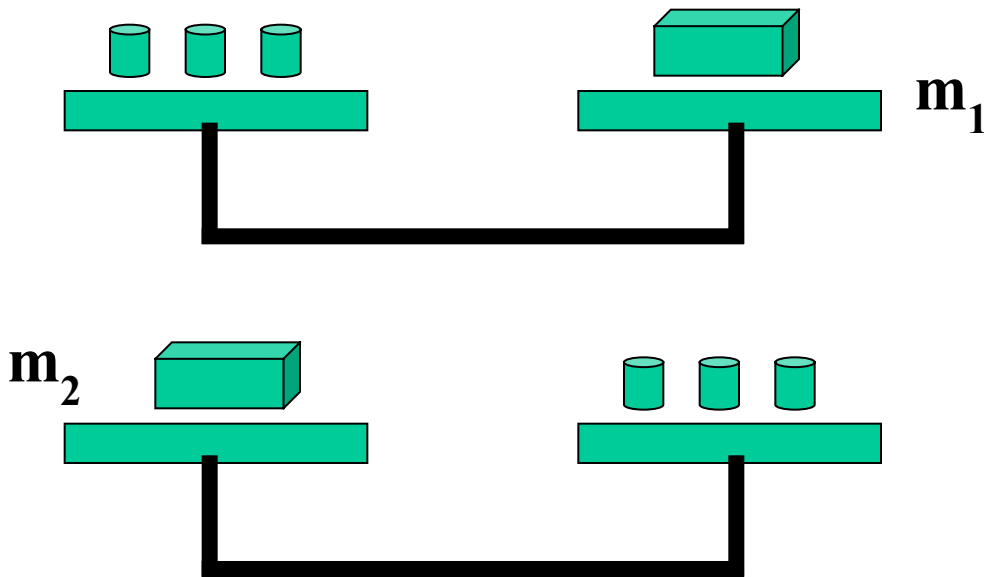
По этому принципу действует нониус штангенциркуля, штангенглубиномера и других приборов. Этот же принцип лежит в основе методов измерений, в которых используются явления биений и интерференции, прием сигналов времени.

- **метод сравнения с мерой** – это метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.
- **Мера** - средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с приписанными им значениями.

### Частные случаи метода сравнения с мерой:

- 1) **нулевой метод** (метод полного уравновешивания) – это метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на средство сравнения доводят до нуля.

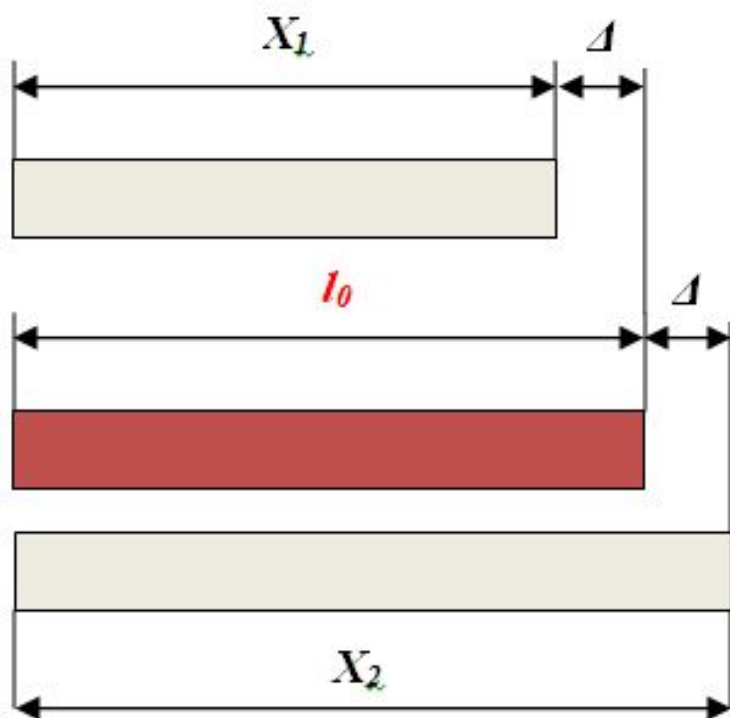
**2) метод измерений замещением** – это метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины.



Исправленное значение массы (с учетом погрешности):

$$m = \sqrt{m_1 \cdot m_2}$$

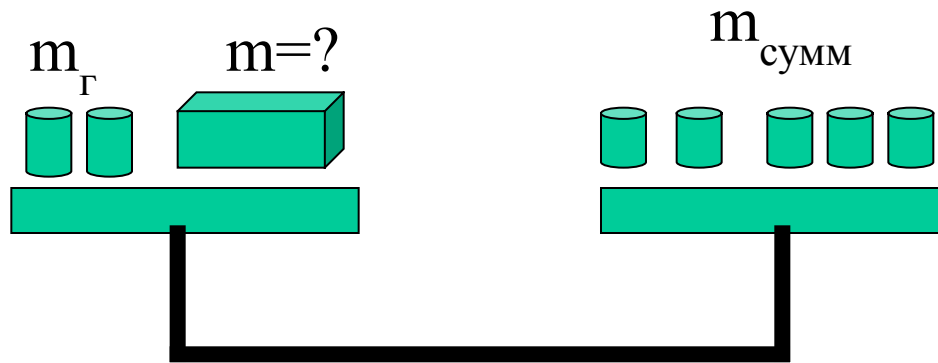
**3) дифференциальный метод** (разностный метод) – это метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, при котором измеряется разность между этими двумя величинами.



$$X = l_0 \pm \Delta.$$

## 4) метод дополнения

- метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению.



$$m = m_{\text{сумм}} - m_{\Gamma}$$

## Контактный метод

- - метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения.
- *Измерение диаметра вала измерительной скобой.*
- *Измерение температуры тела термометром*

## Бесконтактный метод

- - метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент средства измерений не приводится в контакт с объектом измерения.
- *Измерение температуры объекта пирометром.*
- *Измерение расстояния до объекта дальномером*

## § 2. Международная система единиц СИ

1960 г - принятие Международной системы единиц (Systeme International), или сокращенно — СИ (SI).

### Основные преимущества СИ:

- десятичная система образования кратных и дольных единиц, соответствующая десятичной системе нашего числового счета.

$$1\text{ м} = 100\text{ см} = 1000\text{ мм} = 0,001\text{ км}.$$

- **Когерентность** (согласованность) системы единиц заключается в том, что во всех формулах, определяющих производные единицы в зависимости от основных, коэффициент всегда равен единице. Это дает ряд существенных преимуществ, упрощает образование единиц различных величин и проведение вычислений с ними.

$$1\text{ Н} = 1\text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$$



# Единицы физических величин СИ

**Основные единицы** устанавливаются или выбираются таким образом, чтобы, пользуясь закономерной связью между величинами, можно было образовать единицы других величин.

Под закономерной связью между величинами подразумевается возможность математически выразить зависимость одной величины от других.

Величина	Единица измерения	Обозначение	
		русское	международное
Длина	Метр	М	m
Масса	Килограмм	кг	kg
Время		Секунда	с
Сила электрического тока	Ампер	А	A
Термодинамическая температура	Кельвин	К	K
Сила света	Кандела	кд	cd
Количество вещества	Моль	моль	mol

Основная величина	Символ для размерности
длина	L
масса	M
время	T
электрический ток	I
термодинамическая температура	$\Theta$
количество вещества	N
сила света	J

# ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИ

**- величины, входящие в систему величин и определяемые через основные величины этой системы.**

Они образуются на основании законов, устанавливающих связь между физическими величинами или на основании определений физических величин.

*17 производных единиц, имеющие собственные наименования:*  
Частота. Сила. Давление. Энергия, работа, количество теплоты.  
Мощность. Количество электричества, электрический заряд.  
Электрическое напряжение. Электрическая емкость.  
Электрическое сопротивление. Электрическая проводимость.  
Поток магнитной индукции. Индуктивность. Световой поток.  
Освещенность. Активность нуклида. Доза излучения.

*Пример - Примеры производных величин механики системы LMT: скорость  $v$  поступательного движения, определяемая (по модулю) уравнением  $v = dl/dt$ , где  $l$  - путь,  $t$  - время; сила  $F$ , приложенная к материальной точке, определяемая (по модулю) уравнением  $F = ma$ , где  $m$  - масса точки,  $a$  - ускорение, вызванное действием силы  $F$ .*

**3.10 Международная система величин:** Система величин, основанная на подмножестве семи основных величин: длины, массы, времени, электрического тока, термодинамической температуры, количества вещества и силы света.

**3.11 размерность (величины):** Выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных величин в различных степенях и отражающее связь данной величины с величинами, принятыми в данной системе величин за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1.

Таким образом, размерность величины  $Q$  обозначается как  $\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\varepsilon N^\zeta J^\eta$ , где показатели степени, называемые показателями размерности, положительные, отрицательные или равные нулю.

Примечание - Показатели степени  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta$  в формуле, приведенной в 3.11, называют показателями размерности производной величины  $Q$ . Показатель размерности основной величины в отношении самой себя равен единице.

# Дополнительные единицы СИ

для образования единиц угловой скорости, углового ускорения и др.

- **Радиан** — угол между двумя радиусами окружности, дуга между которыми по длине равна радиусу. Один радиан составляет  $57^{\circ} 47' 44,8''$ .
- **Стерadian** — телесный угол, вершина которого расположена в центре сферы и который вырезает на сфере поверхность, площадь которой равна площади квадрата со стороной, по длине равной радиусу сферы.
- Измеряют телесные углы путем определения плоских углов и проведения дополнительных расчетов по формуле
- $\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha/2)$ ,
- где  $\Omega$  — телесный угол;  $\alpha$  — плоский угол при вершине конуса, образованного внутри сферы данным телесным углом.
- Телесному углу 1 ср соответствует плоский угол, равный  $65^{\circ} 32'$ ; углу  $\pi$  ср — плоский угол, равный  $120^{\circ}$ ; углу  $2\pi$  ср — плоский угол, равный  $180^{\circ}$ .

Величина	Единица измерения	Обозначение	
		русское	международное
Плоский угол	Радиан	рад	rad
Телесный угол	Стерadian	ср	sr

Полная совокупность основных и производных единиц является системой единиц физических величин.

## Кратные и дольные единицы

- образуются путем присоединения приставок, взятых из латинского, греческого и датского языков.

Множитель	Приставка	Обозначение		Множитель	Приставка	Обозначение	
		русское	международное			русское	международное
$10^{18}$	Экса	Э	E	$10^{-1}$	Деци	д	d
$10^{15}$	Пета	П	P	$10^{-2}$	Санتي	с	c
$10^{12}$	Тера	Т	T	$10^{-3}$	Милли	м	m
$10^9$	Гига	Г	G	$10^{-6}$	Микро	мк	μ
$10^6$	Мега	М	M	$10^{-9}$	Нано	н	n
$10^3$	Кило	к	k	$10^{-12}$	Пико	п	p
$10^2$	Гекто	г	h	$10^{-15}$	Фемто	ф	f
$10^1$	Дека	да	da	$10^{-18}$	Атто	а	a

## Особенности метода построения системы единиц величин:

1. Размеры производных единиц зависят от размеров основных единиц.

$$S=a*b \quad [M^2]=[M]*[M]$$

2. Построение системы единиц возможно для любых величин, между которыми имеется связь, выражаемая в математической форме в виде уравнения.
3. Выбор величин, единицы которых должны стать основными, ограничивается соображениями рациональности и тем, что позволило бы образовать максимальное число произвольных единиц.



# §3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

- **Погрешность измерения** – разность между измеренным значением величины и опорным значением величины.
- Если опорное значение величины известно, как, например, при калибровке средств измерений, то **известно** и значение погрешности измерения.
- Если в качестве опорного значения выступает истинное значение величины, то значение погрешности **неизвестно**.

# Классификация погрешностей

- по способу выражения –

**абсолютные**  
**относительные**  
**приведенные**

- по характеру проявления –

**систематические**  
**случайные**  
**промахи**

- по отношению к условиям применения –

**основные**  
**дополнительные**

- по причине возникновения –

**инструментальная**  
**методическая**  
**субъективная**

- **Абсолютную погрешность** определяют как разность  $\Delta = x - x_{\text{д}}$ ,

т.е. это погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины.

- **Относительная погрешность** – это погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к опорному значению измеряемой величины.

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \text{ или } \delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100, \%$$

- **Относительная погрешность является наиболее информативной**, так как дает возможность объективно сопоставлять результаты и оценивать качество измерений выполненных **в разное время, различными средствами или операторами**, а так же **ранжировать погрешности** измеряемой величины с различными размерностями и числовыми значениями.
- **Однако** относительная погрешность измерения **не может быть использована для нормирования погрешности некоторых СИ** (например, электроизмерительных приборов), поскольку при приближении измеряемой величины к нулю, незначительные ее изменения приводят к громадным изменениям  $\delta_x$ .

**Исключение указанного недостатка  
возможно при нормировании  
приведенной погрешности измерения.**

- *Приведенной  $\gamma$*  называется относительная погрешность, выраженная в процентах от некоторого нормирующего значения

$$\gamma = \pm (\Delta / x_N) \cdot 100 \% .$$

Часто за нормирующее значение принимают **верхний предел измерений** СИ, т.е.  $x_N = x_{max}$ .

По характеру проявления погрешности делятся на систематические  $\Delta_c$  и случайные  $\Delta$ .

- 1. Инструментальная погрешность** - это составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого средства измерений.
- 2. Методическая погрешность** обусловлена несовершенством применяемого **метода измерения**. Не указывается в ИД.
- 3. Субъективная погрешность** – это погрешность **оператора**.
- 4. Дополнительная инструментальная погрешность** – от влияния **внешних условий**.

# Случайная погрешность

- это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных в определенных условиях.
- не наблюдается какой-либо закономерности, они обнаруживаются при повторных измерениях одной и той же величины в виде некоторого разброса получаемых результатов.
- неизбежны, неустранимы и всегда присутствуют в результатах измерений.
- описание возможно только на основе теории вероятностей и математической статистики.
- нельзя исключить из результатов измерений путем введения поправок.
- можно существенно уменьшить путем увеличения  $N$ , тогда  $X_{\text{ср}} \rightarrow Q$ .

# Случайные погрешности измерений

Если полностью исключить систематические погрешности, то случайные погрешности:

- равные по абсолютной величине положительные и отрицательные погрешности равновероятны;
- большие погрешности наблюдаются реже, чем малые;
- с увеличением числа измерений одной и той же величины  $\Delta_{\text{ср}} \rightarrow 0 \quad \text{---} \quad X_{\text{ср}} \rightarrow Q$ .

Наиболее универсальный способ описания случайных величин заключается в отыскании их интегральных или дифференциальных функций распределения.



# Систематические погрешности

- это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.
- не изменяется при многократных измерениях и может быть почти полностью устранена путем обнаружения и устранения **причины**, по которой она возникла, или путем **введения поправки** ( $\Delta_{\text{сист}} = X - Q$ ).
- Часть систематических погрешностей, трудно поддающихся учету, причисляют к случайным.

# ГРУБЫЕ ПОГРЕШНОСТИ (ПРОМАХИ)

- погрешность, возникшая вследствие недосмотра оператора или неисправности прибора (например, если оператор неправильно прочёл номер деления на шкале прибора или если произошло замыкание в электрической цепи)..
- обнаруживают и отбрасывают непосредственно в процессе измерений или при математической обработке результатов измерения с использованием специальных критериев.

# Систематические погрешности и способы их обнаружения и устранения

1. **Инструментальные погрешности** возрастают, как правило, при увеличении срока службы измерительных средств. Опасно в эталонных СИ, используемых для поверки рабочих СИ.

Необходимо назначать разумный межповерочный интервал с учетом условий и интенсивности эксплуатации измерительных средств.

1. **Методические погрешности:** теоретические (погрешности измерительной модели, или погрешности метода) и практические (погрешности установки прибора и т.п.).

**2.1 Теоретические погрешности** — соответствие, корректность измерительной модели исследуемому объекту, использование упрощений или допущения при вычислении результатов измерений.

## **2.2 Практические погрешности — это погрешности установки прибора и погрешность оператора.**

- **Погрешности установки прибора** — отклонения от горизонтали или вертикали при установке весов, геодезических приборов и др.; несогласованность характеристик отдельных приборов, входящих в измерительный комплекс; неправильность установки прибора.
- **Погрешность оператора (субъективная)** — запаздывание при регистрации измерительного сигнала, низкая точность отсчета по шкале, приложение недостаточных или избыточных физических усилий при выполнении измерений, неправильный выбор позиции.

### 3. Погрешности внешних влияний

Используют следующие **пути учета и исключения** систематических погрешностей от внешних воздействий:

1. Устранение источников погрешностей или обеспечение защиты от них до начала измерений.
1. Исключение погрешностей в процессе измерения специальными методами или вычисление и внесение в результат измерения соответствующих поправок.  
При этом используют метод сравнения с мерой.

# Суммирование погрешностей измерений.

- это определение расчетным путем оценки результирующей погрешности по известным оценкам ее составляющих.
- **На практике** суммирование заключается, как правило, в определении среднего квадратического отклонения ( $\sigma_{\Sigma}$ ) результирующей погрешности по известным  $\sigma_i$  составляющих погрешностей.
- При этом используют ряд упрощений и допущений.

# Примеры:

- $Q = a + b + c + \dots + n$ :

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + \sigma_c^2 + \dots + \sigma_n^2}$$

- Если суммируемых составляющих более 5, то распределение близко к нормальному. По функции Лапласа строим доверительный интервал.
- Если используют СИ с известными предельными погрешностями, заданными из условия трех сигм ( $\Delta \leq 3\sigma$ ), и при измерениях не вносятся дополнительные методические погрешности, то

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_a^2 + \Delta_b^2 + \Delta_c^2 + \dots + \Delta_n^2}$$

$$\Delta \leq 3\sigma \text{ с}$$
$$P = 0,997$$

# Кривая нормального распределения случайной величины

$p(x)$  — дифференциальная функция распределения случайной величины;

$\sigma$  — среднее квадратическое отклонение;

$m_x$  — математическое ожидание

$-3\sigma$      $-2\sigma$      $-\sigma$      $m_x$      $+\sigma$      $+2\sigma$      $+3\sigma$



**критерий ничтожно малой погрешности, т.е.**  
**правило, позволяющее исключать ее из**  
**расчета**

наименьшую случайную погрешность  
**можно не учитывать**, если ее  $\sigma$  в 3 раза  
меньше, чем  $\sigma$  любой из оставляемых  
погрешностей.