

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ



*Баковец Николай Владимирович  
Первый зам. директора БелГИМ*

# Средства измерений

---

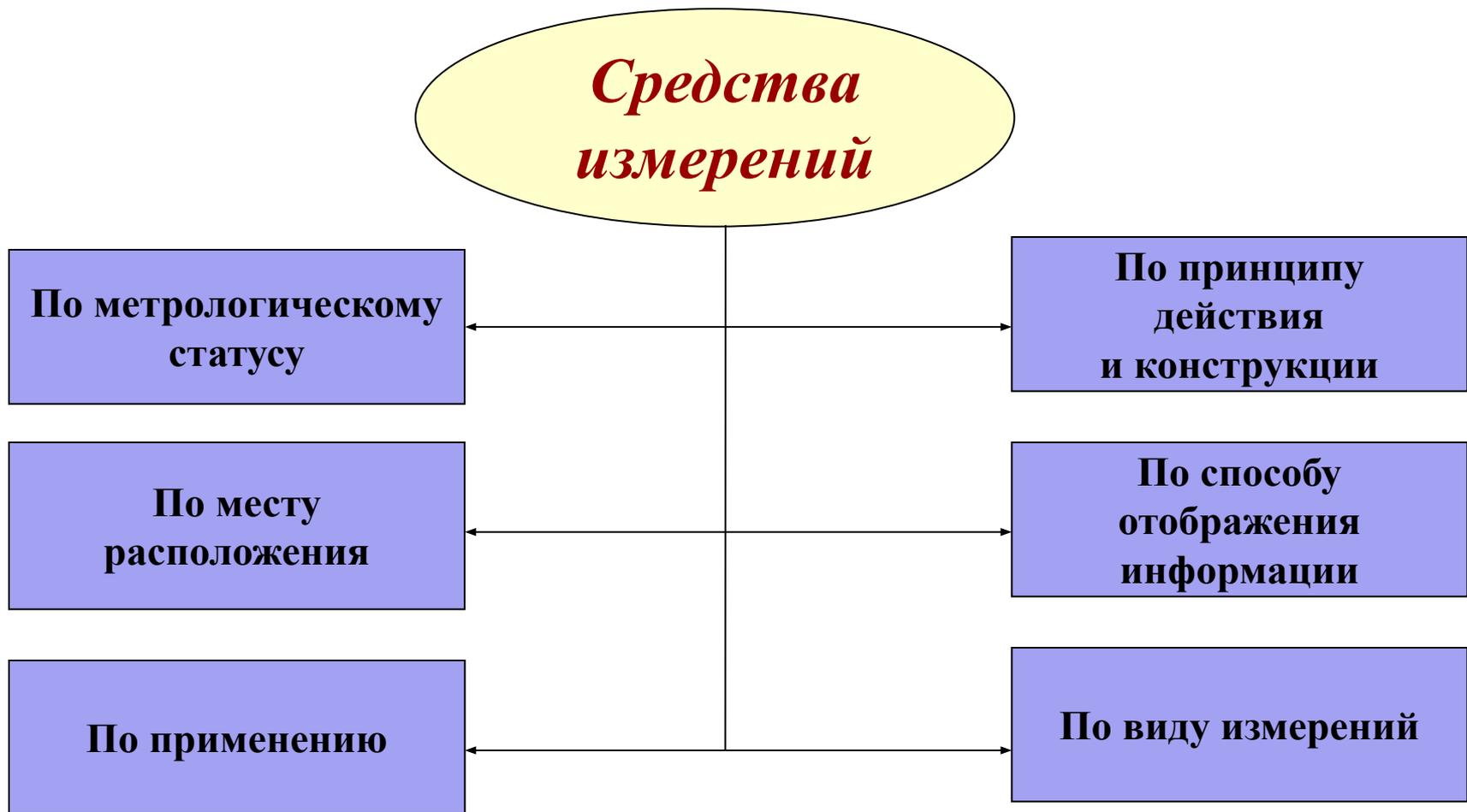
## **средство измерений**

- ▣ de Messmittel
- ▣ en measuring instrument
- ▣ fr instrument de mesure;
- ▣ appareil mesure

Техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

# Классификация средств измерений

---



# Классификация средств измерений

---

## По метрологическому статусу

Эталоны

Рабочие СИ

Индикаторы

## По применению

основные

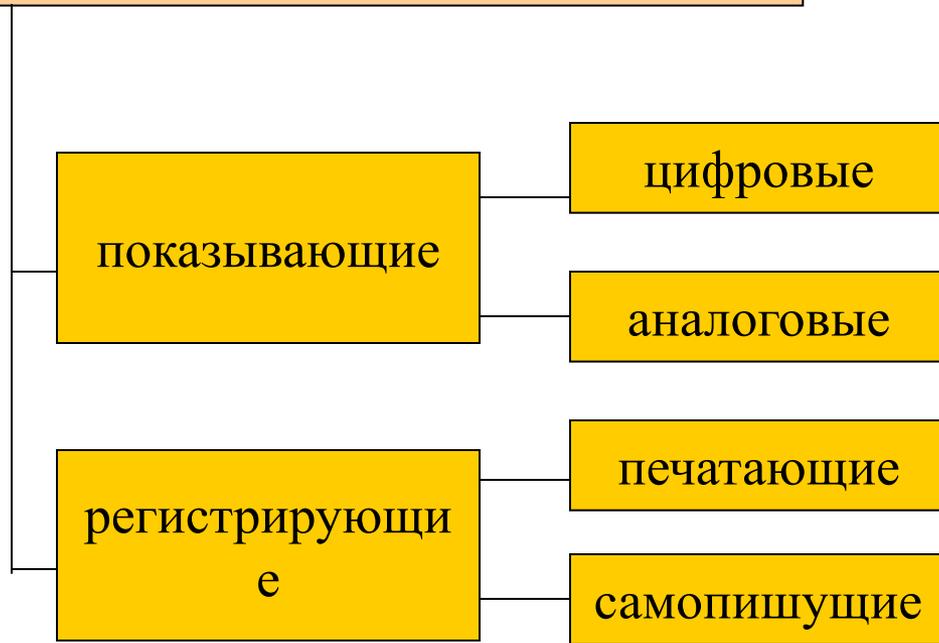
Вспомогательные

Средства сравнения

# Классификация средств измерений

---

По способу отображения информации



По месту расположения



# Классификация средств измерений

## По виду измерений

01 геометрические

02 массы

03 силы и твердости

04 давления

05 вакуума

06 параметров движения

07 расхода и вместим.

08 вязкости и  
плотности

09 физ.-химические

10 температуры

11 оптич.и оптико-физ

12 акустические

13 электрические

14 магнитные

15 времени и частоты

16 радиоэлектронные

17 ионизирующие

# Классификация средств измерений

По принципу действия и конструкции

Меры

однозначные

многозначные

Измерительные  
преобразователи  
и

первичные

вторичные

Измерительные приборы

Измерительные  
системы

ИВК

ИИС

ПК

Измерительные установки

# 1- Мера

---

**Мера** - средство измерения, предназначенное для воспроизведения размера единиц физических величин.

Делятся на :

1. **Однозначные** - для воспроизведения единицы величины одного размера (например: прямоугольник, эталон сопротивления)

2. **Многозначные** - для воспроизведения единицы величины разного размера (например: линейка измерительная, магазин сопротивлений)

## 2- Измерительные преобразователи

---

**Измерительные преобразователи** - СИ, предназначенные для преобразования, обработки, передачи сигналов измерительной информации (непосредственно связанной с измеряемой величиной) в форме, удобной для указанных выше целей, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателя.

- ▣ *Преобразователи эл. величин в электрические (датчики тока, шунты, добавочные сопротивления, измерительные усилители)*
- ▣ *Преобразователи магнитных величин в электрические (датчики Холла, магниторезисторы и т.д.)*
- ▣ *Преобразователи неэлектрических величин в электрические:*
  - *Параметрические (пассивные)*
    - ▣ *тензорезисторы, терморезисторы*
  - *Генераторные (активные)*
    - ▣ *термопара, индукционные.*

# 3- Измерительные приборы

---

**Измерительные приборы** - средства измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателями.

Измерительные приборы включают один или несколько измерительных преобразователей и присоединенное к ним устройство для отображения измерительной информации.

## **Различают:**

- по выходным параметрам: аналоговые и цифровые
- по принципу действия: механические, электро-механические (магнито-электрические, электро-магнитные, электростатические)
- показывающие и регистрирующие

**Примечание:** при необходимости приборы объединяются в измерительные установки

# «Международный словарь по метрологии» (VIM)

---

## 3.3 (4.6)

### **измерительный прибор с индикацией**

*англ.* **indicating measuring instrument**

*фр.* **appareil de mesure indicateur, m; appareil indicateur, m**

**измерительный прибор**, который обеспечивает выходной сигнал, несущий информацию о **значении величины**, которая измеряется

**ПРИМЕРЫ** Вольтметр, микрометр, термометр, электронные весы.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1** Измерительный прибор с индикацией может выполнять запись своих показаний.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2** Выходной сигнал может быть представлен в визуальной или звуковой форме. Он может также быть передан одному или нескольким другим устройствам.

## 3.4 (4.6)

### **измерительный прибор с показанием**

*англ.* **displaying measuring instrument**

*фр.* **appareil de mesure afficheur, m; appareil afficheur, m**

**измерительный прибор с индикацией**, в котором выходной сигнал представляется в визуальной форме

## 4 - Измерительные установки

---

**Измерительная установка** - совокупность средств измерений и других вспомогательных устройств, объединенных между собой и предназначенных для получения измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателями, и расположенных в одном месте.

# 5 - Измерительная система

---

**Измерительная система** - совокупность функционально объединенных средств измерений, средств вычислительной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту, в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления.

Измерительные системы делятся по назначению:

- системы измерения
- системы автоматизированного контроля
- системы технической диагностики
- измерительно-вычислительные комплексы для исследований и управления и др.

# «Международный словарь по метрологии» (VIM)

---

## 3.2 (4.5)

### **измерительная система**

*англ. measuring system*

*фр. système de mesure,*

набор из одного или более **измерительных приборов** и часто и других устройств, включающий, при необходимости, реактивы или источники питания, собранный и приспособленный для получения информации об **измеренных значениях величины** в пределах установленных интервалов для **величин** определенных **родов**

**ПРИМЕЧАНИЕ** Измерительная система может состоять только из одного измерительного прибора.

# Средства измерений

---

- рабочее средство измерений** - средство измерений, предназначенное для измерений, не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерений
- основное средство измерений** - средство измерений той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей
- вспомогательное средство измерений** - средство измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерений необходимо учитывать для получения результатов измерений требуемой точности.
- автоматическое средство измерений** - средство измерений, производящее без непосредственного участия человека измерения и все операции, связанные с обработкой результатов измерений, их регистрацией, передачей данных или выработкой управляющего сигнала.
- автоматизированное средство измерений** - средство измерений, производящее в автоматическом режиме одну или часть измерительных операций.

# Средства измерений

---

## **стандартный образец;**

- ▣ de bestatigte Normalprobe
- ▣ en certified reference material
- ▣ fr matériau de référence certifié

Образец вещества (материала) с установленными в результате метрологической аттестации значениями одной или более величин, характеризующими свойство или состав этого вещества (материала).

# «Международный словарь по метрологии» (VIM).

---

5.13 (6.13)

## **образцовый материал**

англ. **reference material, RM**

фр. **matériau de référence, m; MR** (abréviation)

материал в достаточной мере однородный и стабильный в отношении определенных свойств, который был приготовлен таким образом, чтобы соответствовать его предполагаемому использованию при **измерении** или исследовании **качественных свойств**

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Исследование качественного свойства обеспечивает значение качественного свойства и связанную с ним неопределенность. Эта неопределенность не является **неопределенностью измерения**.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Образцовые материалы с приписанными **значениями величины** или без них могут использоваться для контроля **прецизионности измерения**, тогда как только образцовые материалы с приписанными значениями величины могут использоваться для **калибровки** или контроля **правильности измерения**.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 Понятие "**образцовый материал**" включает в себя материалы, воплощающие как **величины**, так и качественные свойства.

ПРИМЕЧАНИЕ 4 Образцовый материал иногда включают в состав специально созданного устройства.

ПРИМЕЧАНИЕ 5 Некоторые образцовые материалы имеют приписанные значения величины, которые являются метрологически прослеживаемыми к **внесистемной единице измерения**. К таким материалам относят вакцины, которым Международные единицы (IU) приписываются Всемирной организацией здравоохранения.

ПРИМЕЧАНИЕ 6 В данном **измерении** данный образцовый материал может использоваться только для калибровки, или для обеспечения качества.

ПРИМЕЧАНИЕ 7 Спецификация на образцовый материал должна включать его материальную прослеживаемость, которая показывает его происхождение и изготовление (Accred.Qual.Assur.:2006)[45].

ПРИМЕЧАНИЕ 8 ISO/REMCO имеет аналогичное определение[45], но термин "процесс измерения" применяется для обозначения понятия "исследование" (ISO 15189:2007, 3.4), которое охватывает и измерение величины и исследование качественного свойства.

(прим. пер.: в отечественной литературе понятию "образцовый материал" соответствует понятие "стандартный образец")

# «Международный словарь по метрологии» (VIM).

5.14 (6.14)

## **сертифицированный образцовый материал**

англ. **certified reference material, CRM**

фр. **matériau de référence certifié, m; MRC** (abréviation)

**образцовый материал**, который сопровождается документацией, выданной авторитетным органом и предоставляющий одно или более значений определенного свойства с соответствующими неопределенностями и прослеживаемостью с использованием узаконенных процедур

ПРИМЕР Человеческая сыворотка с приписанным **значением величины** для концентрации холестерина и связанной **неопределенностью измерения**, указанными в сопроводительном сертификате, которая используется как **калибратор** или материал для контроля **правильности измерения**.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 "*Документация*" представляется в форме "*сертификата*" (см. ISO Guide 31:2000).

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Процедуры для изготовления и сертификации сертифицированных образцовых материалов приведены, например, в ISO Guide 34 и ISO Guide 35.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 В этом определении "*неопределенность*" охватывает и понятие "*неопределенность измерения*" и понятие "*неопределенность, связанная со значением **качественного свойства***", такого как, например, идентичность и последовательность. "*Прослеживаемость*" охватывает и понятие "***метрологическая прослеживаемость значения величины***" и понятие "*прослеживаемость значения **качественного свойства***".

ПРИМЕЧАНИЕ 4 Установленные значения величины для сертифицированных образцовых материалов требуют метрологической прослеживаемости со связанной неопределенностью измерения (Accred.Qual.Assur.:2006)[45].

ПРИМЕЧАНИЕ 5 ISO/REMCO имеет аналогичное определение, но использует атрибуты "*метрологический*" (metrological) и "*метрологически*" (metrologically) по отношению как к величине, так и к номинальному свойству.

# Средства измерений

---

**Индикатор** - техническое средство или вещество, предназначенное для установления наличия какой-либо физической величины или превышения уровня ее порогового значения.

Примеры:

Индикатором наличия (или отсутствия) измерительного сигнала может служить осциллограф.

При химических реакциях в качестве индикатора применяют лакмусовую бумагу и какие-либо вещества.

В области измерений ионизирующих излучений индикатор часто дает световой и (или) звуковой сигнал о превышении уровнем радиации его порогового значения

# Метрологическая характеристика СИ

---

**Метрологическая характеристика СИ** – характеристика одного из свойств СИ, влияющая на результат измерения и на его погрешность.

Различают:

- 1) показатели общего назначения
- 2) показатели, относящиеся к метрологическим характеристикам СИ

## **1) Показатели общего назначения :**

- показатели назначения (показатели функциональной и технической эффективности; показатели состава и структуры; конструктивные);
- показатели надежности;
- экономические показатели;
- эргономические показатели;
- эстетические показатели;
- показатели технологичности;
- показатели транспортабельности;
- показатели стандартизации и унификации;
- патентно-правовые показатели;
- экологические показатели;
- показатели безопасности.

# Метрологическая характеристика СИ

---

- 2) Показатели, относящиеся к метрологическим характеристикам** средствам измерений, подразделяются на:
- характеристики, используемые для нахождения результатов измерений;
  - характеристики, устанавливающие точность измерений;
  - характеристики, определяющие чувствительность средств измерений к внешним влияющим величинам;
  - динамические характеристики;
  - характеристики взаимодействия средств измерений с объектами измерений и другими устройствами.

**показатели технических средств +  
метрологические характеристики =  
показатели средств измерений**

# Характеристики средств измерений

---

- Статическая характеристика преобразования
- Чувствительность
- Цена деления
- Диапазон измерений
- Погрешность
- Входной и выходной импедансы
- Быстродействие
- Динамические характеристики

# 1 - Статическая характеристика преобразования (ХП)

Зависимость между выходным и входным информационными параметрами измеряемой величины

$$Y=f(x); y=f_{\text{ном}}(x)$$

Номинальная ХП указывается в паспорте устройства.

Градуировочная ХП задается:  
таблицей, формулой, графиком.

## 2 - Чувствительность (S)

$$S = \lim(dY/dX) \text{ при } dX \rightarrow 0$$

$dY$  – изменение выходного сигнала

$dX$  – изменение входного сигнала

Если  $S = \text{const}$  – равномерная шкала преобразования.

$C = 1/S$  – цена деления (постоянная прибора).

Порог чувствительности – наименьшее изменение входного сигнала, которое можно обнаружить с помощью данного прибора.

### 3 -Цена деления

Значение величины между двумя соседними отметками (для аналогового прибора).



Наименьшая цена единицы младшего разряда кода (для цифрового прибора).

## 4 - Диапазон измерений

Диапазон измерений - область значений измеряемой величины, для которой нормированы погрешности СИ.



Диапазон показаний – разность между верхним и нижним значениями измеряемой величины.

# Погрешность средства измерения

разность между показанием СИ и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

Погрешность СИ является основной характеристикой точности СИ



Закономерности проявления погрешности:

**Систематическая** – постоянна или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины.

**Случайная** – изменяется случайным образом, можно оценить только с помощью статистических методов

**Методическая** – погрешность возникает при проектировании СИ или метода измерения.

# Погрешность СИ по способу выражения

1) Абсолютная:  $\Delta$  [в единицах физической величины]

2) Относительная:  $\delta = \pm \frac{\Delta}{X_0} \cdot 100\% \approx \pm \frac{\Delta \cdot 100\%}{X}$

3) Приведенная:  $\gamma = \pm \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\%$

где :

$X_0$  – измеренное значение,

$X_N$  – нормируемое значение

## Взаимная связь абсолютной, относительной и приведенной погрешностей

---

$$\Delta = \pm a; \delta = \pm \frac{a}{x} \cdot 100\%; \gamma = \pm \frac{a}{x_N} \cdot 100\%$$

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100\% = \pm P; \Delta = \pm \frac{P \cdot X_N}{100\%}; \delta = \pm \frac{\Delta}{x} \cdot 100\% = \pm \frac{P \cdot X_N}{X}$$

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{x} \cdot 100\% = \pm q; \Delta = \pm \frac{q \cdot x}{100\%}; \gamma = \pm \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100\% = \pm \frac{q \cdot x}{x_N}$$

## 6 - Быстродействие

количество измерений в 1 сек.

- для аналоговых составляет - 1 измерение за 4 секунды.
- для цифровых составляет - до сотен тысяч в 1 секунду.



## 7 – Входной и выходной импедансы

характеристики взаимодействия с подключаемыми средствами измерения.

Обычно входные и выходные импедансы представляются в комплексном виде, поскольку они, как правило, включают в себя активные и реактивные компоненты.

**Пример:** выходной импеданс – характеристика, указывающая насколько легко датчик согласовывается с электронной схемой

# 8 - Динамические характеристики СИ

Отражают динамические свойства СИ



## **Полные:**

импульсная, переходная, амплитудно-фазовая, амплитудно-частотная, передаточная.

## **Частотные:**

параметры или функционалы полных динамических характеристик (время установления показаний, время реакции, значение амплитудно-частотной характеристики на фиксированной частоте).

# Точность СИ, класс точности СИ

---

**Точность СИ** – способность СИ давать показания (выходные сигналы), близкие к истинному значению измеряемой величины.

**Класс точности СИ** - обобщенная характеристика СИ , выражаемая пределами его допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность.

**Предел допускаемой погрешности СИ** - наибольшее значение погрешности СИ , устанавливаемое нормативно-техническим документом для заданного типа СИ , при котором оно еще признается годным к применению.

Примечание: при превышении установленного предела погрешности СИ признается негодным для применения в данном классе точности.

# ГОСТ 8.401-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования

ГОСТ 8.401—80 Стр. 5

Для электронизмерительных приборов с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений нормирующее значение допускается устанавливать равным сумме модулей пределов измерений.

2.3.4. Для средств измерений физической величины, для которых принята шкала с условным нулем, нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений (см. справочное приложение 2, п. 4).

2.3.5. Для средств измерений с установленным номинальным значением нормирующее значение устанавливают равным этому номинальному значению (см. справочное приложение 2, п. 5).

2.3.6. Для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой нормирующее значение устанавливают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины.

2.3.7. В случаях, не предусмотренных в пп. 2.3.3—2.3.6, указания по выбору нормирующего значения должны быть приведены в стандартах на средства измерений конкретного вида.

2.3.8. Пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm q, \quad (4)$$

если  $\Delta$  установлено по формуле (1),

или по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm \left[ c + d \left( \left| \frac{X_k}{x} \right| - 1 \right) \right], \quad (5)$$

где  $\delta$  — пределы допускаемой относительной основной погрешности, %;

$\Delta$ ,  $x$  — см. п. 2.3.1;

$q$  — отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда, приведенного в п. 2.3.2;

$X_k$  — больший (по модулю) из пределов измерений;

$c$ ,  $d$  — положительные числа, выбираемые из ряда, приведенного в п. 2.3.2

$$c = b + d; \quad d = \frac{a}{|X_k|};$$

$a$ ,  $b$  — см. п. 2.3.1.

В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по более сложной формуле или в виде графика либо таблицы.

# Условия измерений

---

**нормальные условия измерений** - условия измерения, характеризующие совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости.

Температура - 20 °С

Давление – 100 кПа (750 мм рт.ст.)-ионизирующие, теплофизические, температурные, электрические и др.

Давление – 101,3 кПа (760 мм рт.ст.)-геометрические, массы, оптико-физические и др.

Относительная влажность воздуха

58% - геометрические, массы, оптико-физические и др.

55%- электрическое сопротивление

65% - ионизирующие, теплофизические, температурные, электрические, давление, параметры движения

60% - прочие виды

Плотность воздуха -1,2 кг/м<sup>3</sup>

Ускорение свободного падения – 9,8 м/с<sup>2</sup>

**нормальное значение влияющей величины** – значение влияющей величины, установленное в качестве номинального

**нормальная область значений влияющей величины** – область значений влияющей величины, в пределах которой изменением результата измерений под ее воздействием можно пренебречь в соответствии с установленными нормами точности

**рабочие условия измерений** - условия измерений, при которых значения влияющих величин находятся в пределах рабочих областей.

**рабочая область значений влияющей величины** - область значений влияющей величины, в пределах которой нормируют дополнительную погрешность или изменение показаний средства измерений

# Результаты измерений физических величин

---

**результат измерения физической величины** - значение величины, полученное путем ее измерения

- ▣ результат измерения
- ▣ de Messergebnis
- ▣ an result of a measurement
- ▣ fr résultat d'un mesurage

**Качество** измерений характеризуется:

- ▣ **точность** – отражает близость результата измерений к истинному значению измеряемой величины.
- ▣ **правильность** (trueness) - степень близости результата измерений к истинному или условно истинному значению измеряемой величины. Показателем правильности обычно является значение систематической погрешности
- ▣ **прецизионность** (precision) - степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных установленных условиях. Мера прецизионности обычно вычисляется как среднеквадратическое отклонение результатов измерений, выполненных в определенных условиях.

# Результаты измерений физических величин

---

## неисправленный результат измерения;

- ▢ неисправленный результат
- ▢ de unkorrigiertes Messergebnis
- ▢ en uncorrected result
- ▢ fr résultat brut

Значение величины,  
полученное при измерении  
до введения в него  
поправок, учитывающих  
систематические  
погрешности

**$X_i$**

## исправленный результат измерения;

- ▢ исправленный результат
- ▢ de korrigiertes Messergebnis
- ▢ en corrected result
- ▢ fr résultat corrigé

Значение величины,  
полученное при ее  
измерении и уточненное  
путем введения в него  
необходимых поправок на  
действие систематических  
погрешностей

**$X_i + \nabla$**

# Результаты измерений физических величин

## сходимость (повторяемость) результатов измерений;

- сходимость измерений
- de Wiederholbarkeit (von Messungen)
- en repeatability of measurements
- fr répétabilité des mesurages

*Близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.*

Сходимость двух групп многократных измерений может **характеризоваться:**

а) Размахом  $R = X_{\max} - X_{\min}$

б) Среднеквадратической погрешностью    в) Среднеарифметической погрешностью

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

# Результаты измерений физических величин

---

## воспроизводимость результатов измерений

- воспроизводимость измерений
- de Reproduzierbarkeit (der Messungen)
- en reproducibility of measurement
- fr reproductibilité des mesurages

Близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами, разными средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям измерений (температуре, давлению, влажности и др.).

Воспроизводимость результатов измерений **характеризуется** среднеквадратической погрешностью:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

# Результаты измерений физических величин

---

## ряд результатов измерений

Значения одной и той же величины, последовательно полученные из следующих друг за другом измерений

## среднее взвешенное значение величины

- среднее взвешенное
- en weighted mean
- fr moyenne pondérée

Среднее значение величины из ряда неравноточных измерений, определенное с учетом веса каждого единичного измерения

## вес результата измерений;

- вес измерений
- Вес

Положительное число ( $p$ ), служащее оценкой доверия к тому или иному отдельному результату измерения, входящему в ряд неравноточных измерений.

$$p_i = 1/S^2_i$$

●ная

## Погрешности измерений

- По причинам возникновения
- инструментальная

● методическая

● субъективная

- По характеру проявления
- систематическая

### Погрешность результата измерения

погрешность измерения

de Fehler einer Messung

en error of a measurement

fr erreur de mesure

Отклонение результата измерения от истинного

(действительного) значения измеряемой величины

- случайная
- промахи
- условия измерения
- по степени полноты информации
- определенные
- неопределенные

# Абсолютная погрешность измерения

---

- ▣ абсолютная погрешность
- ▣ de absoluter Messfehler
- ▣ en absolute error of a measurement
- ▣ fr erreur absolue de mesure

Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины

$$\Delta x = X_{\text{изм.}} - X_{\text{действ.}}$$

# Относительная погрешность измерения

---

- относительная погрешность
- de relativer Fehler (einer Messung)
- en relative error
- fr erreur relative

Погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины

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

# Инструментальная погрешность измерения

---

Погрешность средства измерения, ее можно разбить на составляющие.

**Пример:** при измерении диаметра детали индикатором часового типа, погрешность стойки включает погрешности измерительной головки + стойки + концевых мер.

Подразделяется :

- конструкторская
- технологическая
- износ и старение

# Методическая погрешность измерений

---

- погрешность метода
- de Fehler aus dem Messverfahren
- en error of method
- fr erreur de methode

*Методическая (теоретическая) погрешность обусловлена несовершенством метода измерений или упрощениями, допущенными при измерениях.*

Возникает из-за :

- *использования приближенных формул при расчете результата*
- *неправильного выбора метода измерений;*
- *выбора ошибочной методики;*
- *отсутствия учета взаимного влияние объекта измерений и измерительных приборов или недостаточная точность такого учета.*

*Методическая погрешность подразделяется на:*

- *погрешности из-за несоответствия процесса измерительного преобразования его идеализированной модели*
- *погрешности из-за несоответствия объекта измерения его идеализированной модели*

# Погрешность условий измерения

---

является следствием неучтенного влияния отклонения в одну сторону какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений, от установленного значения.

## **Условия измерений:**

- ▣ температура*
- ▣ атмосферное давление*
- ▣ влажность воздуха*
- ▣ напряженность магнитного поля*
- ▣ вибрация*
- ▣ другие факторы*

# Субъективная погрешность

---

Составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора

Возникает из-за :

- ▣ *интерполирования доли деления на глаз*
- ▣ *округление до ближайшего деления*
- ▣ *погрешности отсчитывания (операторы опаздывают либо опережают снимать показания)*
- ▣ *параллакс (изменение видимого положение объекта по отношению к удаленному фону в зависимости от нахождения наблюдателя)*

# Систематическая погрешность измерения

---

систематическая погрешность  
de systematischer Anteil des Fehlers  
en systematic error  
fr erreur systématique

$\Delta_c$  - составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

$$\Delta_c = F(\varphi, \psi, \dots)$$

где:  $\varphi, \psi$  - аргументы, вызывающие систематическую погрешность

Главная особенность – возможность выявления, прогнозирования и однозначной оценки.

# Систематическая погрешность измерения

---

Систематические погрешности подразделяются на:

а) **элементарные**

- ▣ постоянные
- ▣ прогрессирующие (линейная, нелинейная, аппроксимация прямыми линиями)
- ▣ периодические (синусоида, косинусоида, пилообразная и др.)

б) **изменяющиеся по сложному закону** (включает постоянную, прогрессирующую и периодическую составляющие)

$$\Delta_c = a + b\psi + d\sin\varphi$$

где  $a$  – постоянная составляющая сложной систематической погрешности

$\varphi$ ,  $\psi$  – аргументы прогрессирующей и периодической составляющих сложной систематической погрешности

# Методы устранения систематических погрешностей

---

**Методы** устранения систематических погрешностей:

- ▣ *Метод замещения,*
- ▣ *Метод противопоставления*
- ▣ *Метод компенсации*
- ▣ *Метод рандомизации*
- ▣ *Графический метод*
- ▣ *Метод симметричных наблюдений*
- ▣ *Специальные статистические методы и др.*

# Случайная погрешность измерения

---

- случайная погрешность
- de zufälliger Anteil des Fehlers
- en random error
- fr erreur aleatoire

$\Delta^\circ$  - составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных с одинаковой тщательностью, одной и той же физической величины.

Случайная погрешность вызывает рассеяние результатов измерений, которое обычно обусловлено проявлением множества случайных причин и носит вероятностный характер. Используется **аппарат теории вероятностей и математической статистики**.

# Элементы аппарата математической статистики и теории вероятностей

---

**Вероятность события**  $P(A)$  – численная мера объективной возможности этого события

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

0 – вероятность невозможного события

1 – вероятность достоверного события

$$P(A) = m / n$$

где:  $m$  – число случаев, благоприятствующих событию  $A$ ,

$n$  – общее число случаев

на практике вместо  $P(A)$  определяют частоту появления случайного события:

$$P^*(A) = m_1 / n_1$$

где:  $m_1$  – число опытов, в которых появилось желаемое событие,

$n_1$  – общее число опытов

Формой закона распределения случайной величины является **функция распределения  $F(x)$**  – вероятность того, что случайная величина  $X$  будет принимать значения меньше некоторого значения  $x$

$$F(x) = P(X < x)$$

для описания  $F(x)$  используют **плотность распределения:**

$$f(x) = dF(x) / dx$$

# Числовые характеристики случайных величин

---

1) **Математическое ожидание** – характеристика места группирования случайных величин на оси

а) для дискретной случайной величины 
$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i$$

б) для непрерывной случайной величины 
$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx$$

2) **Дисперсия** – рассеивание случайных величин вокруг математического ожидания

а) для дискретной случайной величины 
$$D(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 p_i$$

б) для непрерывной случайной величины 
$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx$$

где  $m_x$  – числовое значение математического ожидания случайной величины  $x$

3) **Среднее квадратичное отклонение**

$$\sigma(x) = +\sqrt{D_x}$$

## Пример:

при изготовлении резисторов определены отклонения величин сопротивления от номинала в виде относительных погрешностей  $\delta_0 R_i, \%$

$$\delta_0 R_i = \frac{R_i - R_n}{R_n} \cdot 100 \text{ где: } R_i, R_n \text{ - фактически измеренное и номинальное значение сопротивления}$$

№ измер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Относительная погрешность	+0,1	-0,2	-0,1	+0,1	-0,1	-0,1	+0,3	-0,1	+0,1	-0,2

$$M(\delta_0 R_i) = \frac{\sum_{i=1}^{10} \delta_0 R_i}{10} = -0,02$$

№ измер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_0 R_i - M(\delta_0 R_i), \%$	-0,12	-0,18	-0,08	+0,12	-0,08	-0,08	+0,32	-0,08	+0,12	-0,18
$[\delta_0 R_i - M(\delta_0 R_i)]^2, \%$	0,0144	0,0324	0,0064	0,0144	0,0064	0,0064	0,1024	0,0064	0,0144	0,0324

$$D(\delta_0 R_i) = \frac{\sum_{i=1}^{10} [\delta_0 R_i - M(\delta_0 R_i)]^2}{10 - 1} = \frac{0,2360}{9} = 0,026 \quad \sigma(\delta_0 R_i) = \sqrt{D(\delta_0 R_i)} = 0,16$$

# Случайная погрешность измерения

---

Количественными оценками **рассеяния результатов в ряду измерений** могут быть:

- а) размах результатов,
- б) средняя арифметическая погрешность (по модулю)
- в) средняя квадратическая погрешность или стандартное отклонение (среднее квадратическое отклонение, экспериментальное среднее квадратическое отклонение),
- г) доверительные границы погрешности (доверительная граница или доверительная погрешность).

# Случайная погрешность измерения

---

## **а) размах результатов измерений;**

Оценка  $R_n$  рассеяния результатов единичных измерений физической величины, образующих ряд (или выборку из  $n$  измерений), вычисляемая по формуле

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

где:  $X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значение физической величины в данном ряду измерений

# Случайная погрешность измерения

## б) средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений

средняя квадратическая погрешность измерений;  
средняя квадратическая погрешность;  
СКП  
en experimental standard deviation  
fr écart-type experimental

Оценка  $S$  рассеяния единичных результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины около среднего их значения

где  $x_i$  — результат  $i$ -го единичного измерения;

$\bar{x}$  среднее арифметическое значение измеряемой величины из  $n$  единичных результатов

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

## Случайная погрешность измерения

---

### в) средняя квадратическая погрешность результата измерений среднего арифметического

Оценка случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений одной и той же величины в данном ряду измерений

$$S_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

где  $S$  — средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений, полученная из ряда равноточных измерений;

$n$  — число единичных измерений в ряду

# Случайная погрешность измерения

---

**г) доверительные границы** погрешности результата измерений;

- ▣ доверительные границы погрешности;
- ▣ доверительные границы

Наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений

$$\pm t S; \pm t S_x$$

где  $S$  и  $S_x$  - средние квадратические погрешности, соответственно, единичного и среднего арифметического результатов измерений;  
 $t$  — коэффициент, зависящий от доверительной вероятности  $P$  и числа измерений  $n$ .

**Статистическая обработка** результатов измерений должна проводиться на основе действующей метрологической документации : ГОСТ 8.207, МИ 1317 и др.

# Промехи

---

Погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда

## **Источники промахов:**

- неправильный отсчет по шкале измерительного прибора, происходящий из-за неверного учета цены малых делений шкалы;
- неправильная запись результата наблюдений, значений отдельных мер использованного набора, например гирь;
- хаотические изменения параметров питающего СИ напряжения: например, его амплитуды или частоты.

# Прوماхи

Проверка на промахи:

**а) Критерий "трех сигм". Общая теория**

Считается, что результат, возникающий с вероятностью  $q < 0,003$ , маловероятен и его можно считать промахом

данный критерий надежен при числе измерений  $n \geq 20 \dots 50$

$$(X_i - MO) > 3S_x$$

MO – математическое ожидание X,

$S_x$  – среднеквадратическое отклонение

(данный критерий надежен для результатов измерений  $X_i$ , распределенных по нормальному закону)

**б) Критерий Романовского**

Промех, если  $trp1 > B$  или  $trpn > B$ , где B – коэффициент Романовского

$$\left| (\bar{x} - x_i) / S_x \right| = \beta$$

**в) Критерий Грабса и т.д.**

q	n=4	n=6	n=8	n=10	n=12	n=15	n=20
0,01	1,73	2,16	2,43	2,62	2,75	2,90	3,08
0,02	1,72	2,13	2,37	2,54	2,66	2,80	2,96
0,05	1,71	2,10	2,27	2,41	2,52	2,64	2,78
0,10	1,69	2,00	2,17	2,29	2,39	2,49	2,62

# Определенные и неопределенные погрешности

---

- Определенные погрешности** - любые известные по числовому значению и знаку погрешности, которые могут:
- совпадать с систематическими, выявляться и исключаться из результатов измерений
  - быть случайными, но их значение и знак получены экспериментально

Определенные погрешности можно исключить путем введения **поправок** (значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения погрешности)

**Неопределенные погрешности** - невыявленные и неисключенные систематические, а также случайные и грубые погрешности, значения которых не было определено экспериментально

# Неисключенная систематическая погрешность

составляющая погрешности результата измерений, обусловленная погрешностями вычисления и введения поправок на влияние систематических погрешностей или систематической погрешностью, поправка на действие которой не введена вследствие ее малости.

**Границы** неисключенной систематической погрешности  $\Theta$  при числе слагаемых  $N \leq 3$  вычисляют по формуле:

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^N |\Theta_i|$$

где  $\Theta_i$  — граница  $i$ -й составляющей неисключенной систематической погрешности.

при числе слагаемых  $N \geq 4$  вычисления проводят по формуле:

$$\Theta = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^N \Theta_i^2}$$

коэффициент зависимости отдельных систематических погрешностей от выбранной функции  $P$  при их равномерном распределении

# Номенклатура составляющих погрешности метода непосредственной оценки

1-Погрешность измерений метода непосредственного оценивания

2-Погрешность средства измерений

**3-Методическая погрешность**

**4-Погрешность из-за взаимодействия СИ с объектом измерений**

**5-Погрешность считывания**

6-Основная погрешность СИ

**7-Дополнительная погрешность СИ**

**8-Погрешность из-за нестабильности СИ**

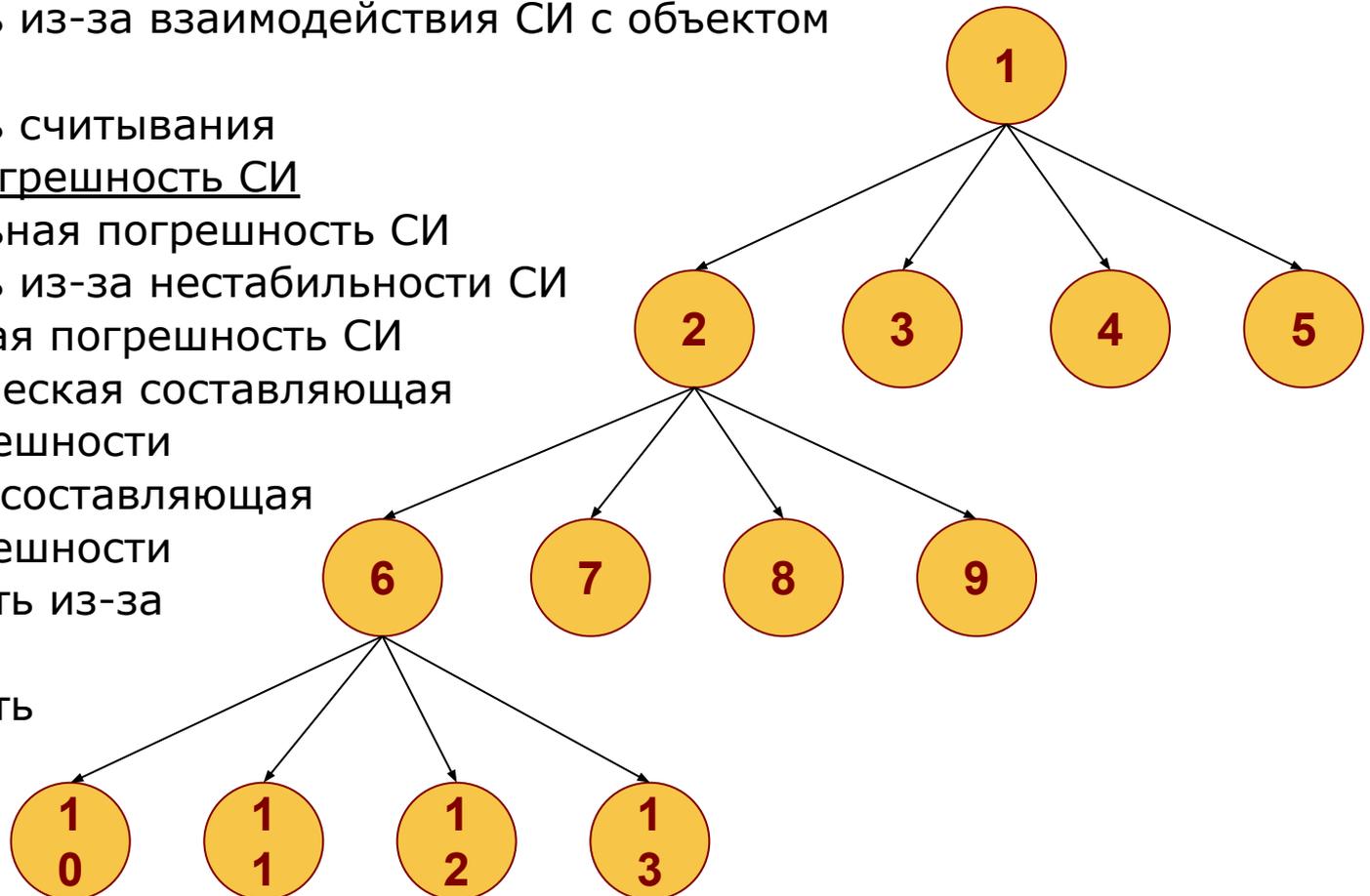
**9-Динамическая погрешность СИ**

**10-Систематическая составляющая основной погрешности**

**11-Случайная составляющая основной погрешности**

**12-Погрешность из-за вариации**

**13-Погрешность из-за дрейфа показаний**



# Способы повышения точности измерений

**2-**Погрешность СИ



Уменьшение всех составляющих

**3-**Методическая погрешность



Выбор способа уменьшения осуществляется в зависимости от источников их возникновения

**4-**Погрешность из-за взаимодействия СИ с объектом измерений



**5-**Погрешность считывания



Выбор СИ с меньшей ценой деления шкалы

# Способы повышения точности измерений

**6**-Основная погрешность СИ

Достигается уменьшением ее составляющих **10;11;12;13**

**7**-Дополнительная погрешность СИ

Исключается полностью, если обеспечить нормальные условия

**8**-Погрешность из-за нестабильности СИ

Добиваются корректировкой межповерочного/ межкалибровочного интервала

**9**-Динамическая погрешность СИ

Основной способ – уменьшение времени измерений

# Способы повышения точности измерений

**10**-Систематическая составляющая основной погрешности

1-й способ

Достигается введением поправок

2-й способ

Способ рандомизации – выполнением многократных наблюдений при измерении влияющих факторов, т.обр., чтобы превратить характер их действия из систематического в случайный

3-й способ

Переход к методу сравнения с мерой

**11**-Случайная составляющая основной погрешности

Уменьшается способом многократных измерений

# Способы повышения точности измерений

**12**-Погрешность из-за вариации



Достигается ее исключения путем выполнения 2-х измерений: «сверху - вниз» и «снизу - вверх». За результат принимается среднее значение

*Характерна для стрелочных приборов*

**13**-Погрешности из-за дрейфа показаний

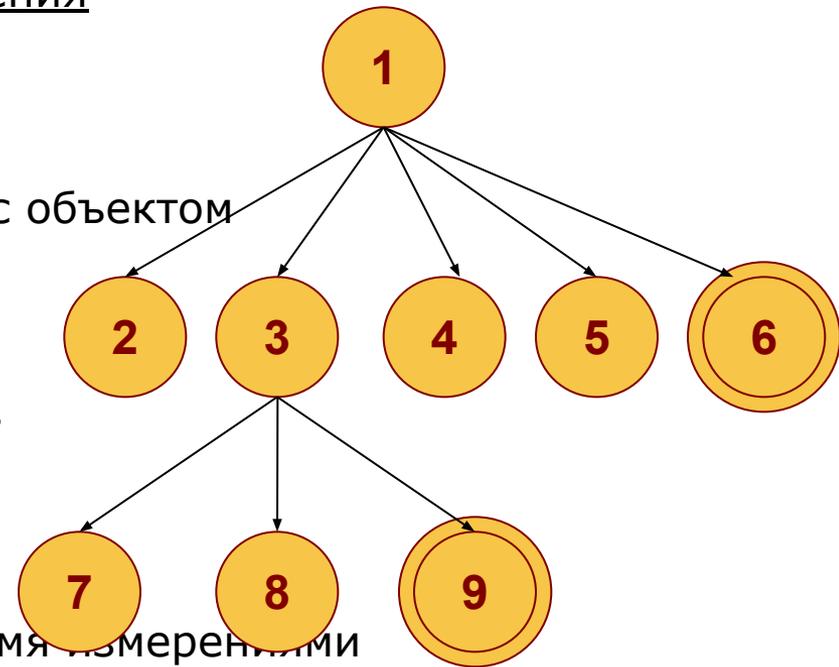


Для ее уменьшения необходимо по результатам экспериментальных исследований выяснить причину и устранить ее.

*Стабилизация внешних факторов;  
Регламентация температуры прогрева и др.*

# Номенклатура составляющих погрешности метода замещения с использованием одной меры

- 1- Погрешность измерений метода замещения
- 2- Погрешность меры
- 3- Погрешности средства измерений
- 4- Методическая погрешность
- 5- Погрешность из-за взаимодействия СИ с объектом измерений и мерой
- 6- Погрешность считывания (проявляется дважды)  
*если применяется компаратор, то один раз*
- 7- Погрешность из-за отличия размеров искомой и известной величины
- 8- Погрешность из-за нестабильности влияющих факторов за период между двумя измерениями
- 9- Случайная составляющая погрешности СИ (проявляется дважды)



$$A = Z_0 + (Y - Y_0)$$

$Z_0$  – номинальное значение меры

$Y$  - показание СИ при измерении измеряемой величины

$Y_0$  - показание СИ при измерении величины, воспроизводимой мерой

---

Спасибо  
за внимание