

Лекция 2

Основные понятия теории погрешностей

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Истинное значение физической величины — идеальным образом характеризующее рассматриваемое свойство данного объекта как в количественном, так и в качественном отношении.

Действительное значение физической величины — значение физической величины, найденное экспериментально и настолько близкое к истинному, что в поставленной измерительной задаче оно может быть использовано вместо него.

Результат измерения — значение величины, полученное путем измерения.

Погрешность результата измерений — отклонение результата измерения X от истинного (или действительного) значения Q измеряемой величины:

$$\Delta X = X - Q$$

Основные понятия

Точность результата измерений — степень близости к нулю значения погрешности результата измерения.

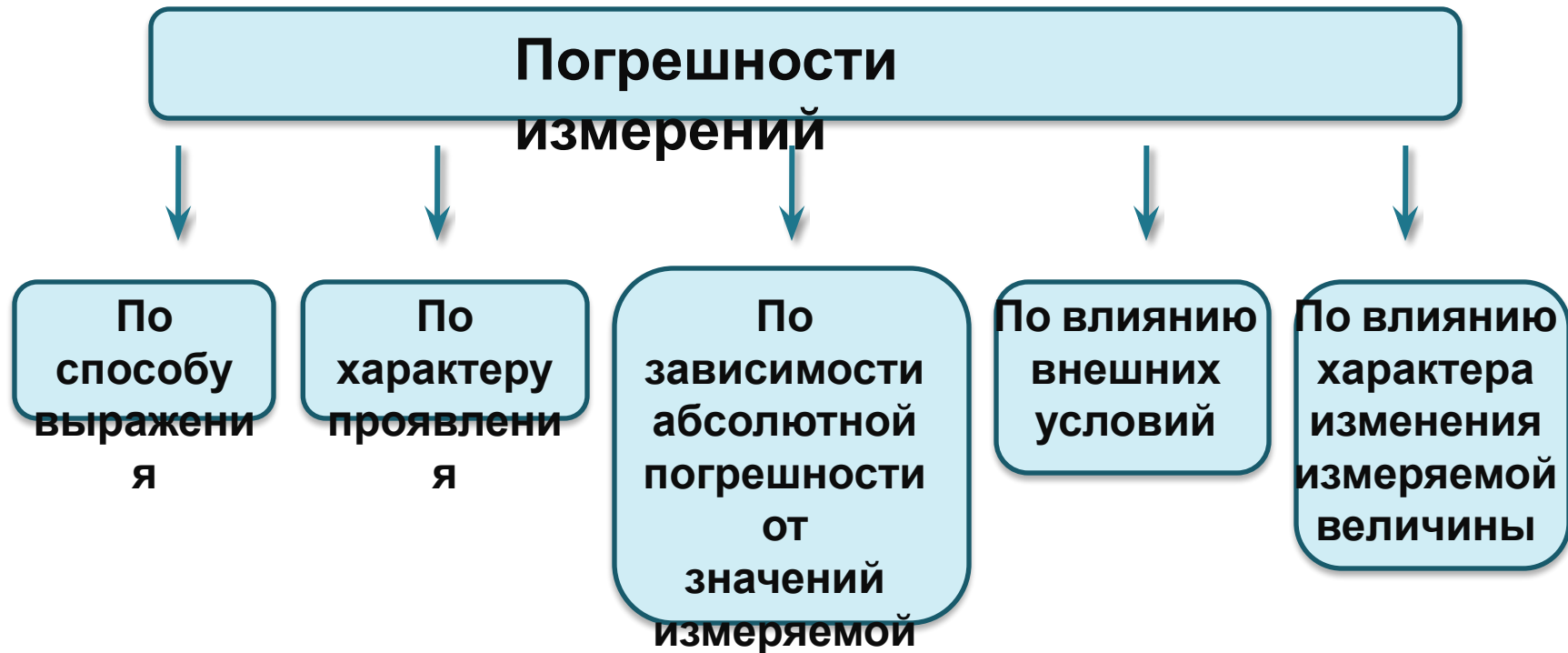
Погрешность средства измерений — разность между показанием средства измерения и истинным (действительным) значением измеряемой физической

Точность средства измерений — степень близости к нулю значения погрешности средства измерения.

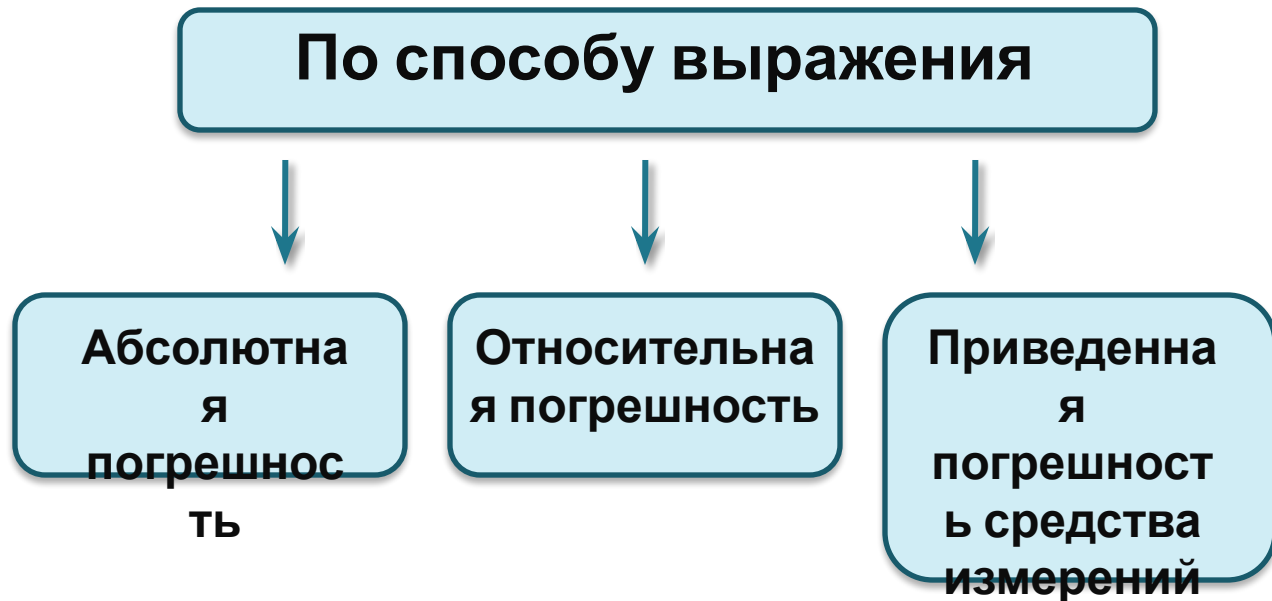
Зависимость сопротивления проводника от температуры

| | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|
| $t, ^\circ\text{C}$ | 20 | 30 | 40 |
| $R, \text{Ом}$ | 100,1 | 100,2 | 100,3 |

Классификация погрешностей



Классификация погрешностей



Классификация погрешностей

По способу выражения

Абсолютная погрешность — разница между результатом измерения X и

истинным (или действительным) значением Q :

$$\Delta X = X - Q$$

Относительная погрешность — отношение абсолютной погрешности измерения к результату измерения величины:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X} \quad \text{или} \quad \delta = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%$$

Классификация погрешностей

По способу выражения

Приведенная погрешность средства измерений — относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность средства измерений отнесена к условно принятому значению X_N , постоянному во всем диапазоне измерений или его части:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N} \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100\%$$

X_N — **нормирующее значение**. Чаще всего за него принимают верхний предел измерений данного средства измерения. Приведенную погрешность обычно выражают в процентах.

Классификация погрешностей



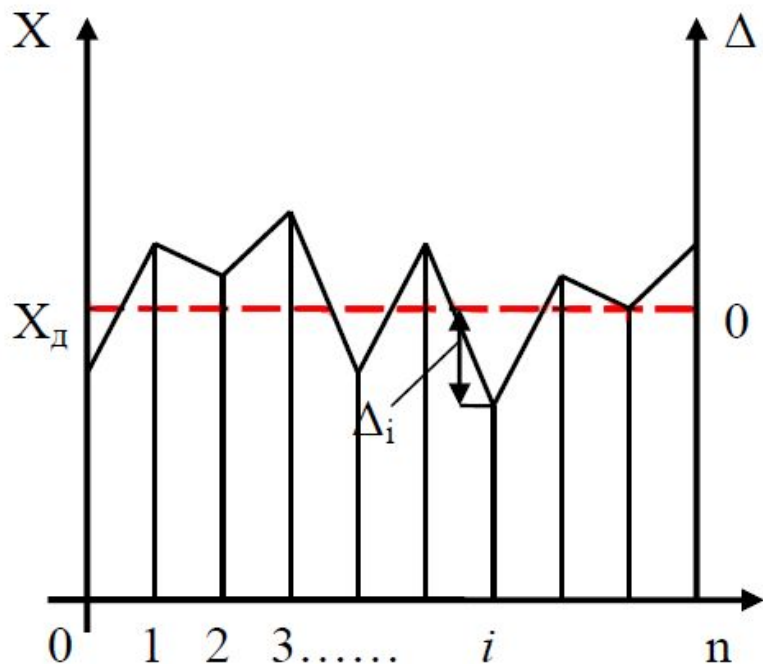
Классификация погрешностей

По характеру проявления

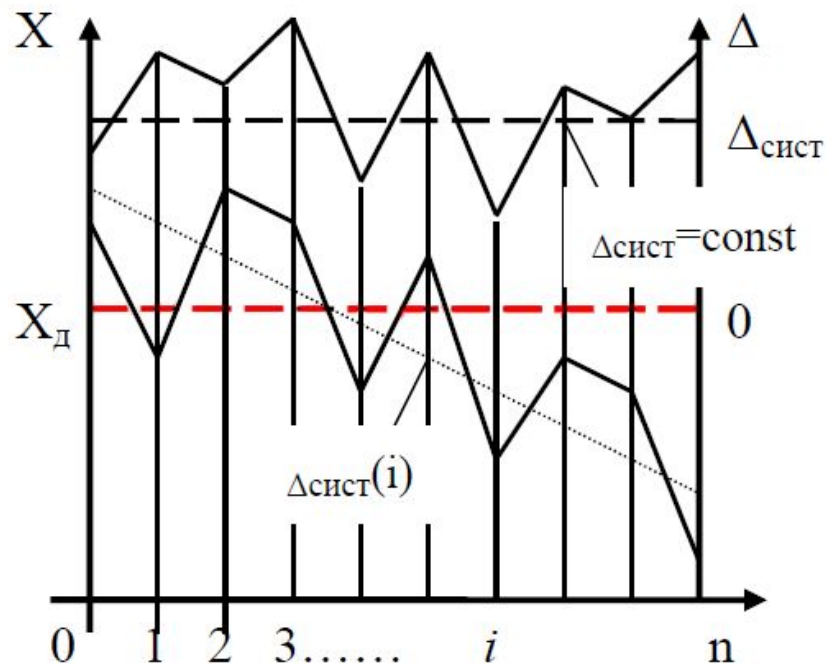
Случайная погрешность – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений одного и того же размера физической величины, проведенных с одинаковой тщательностью в одних и тех же условиях.

Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно меняющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

Классификация погрешностей



Проявление случайной погрешности



Проявление систематической погрешности

(постоянной и перемежающейся)

Классификация погрешностей

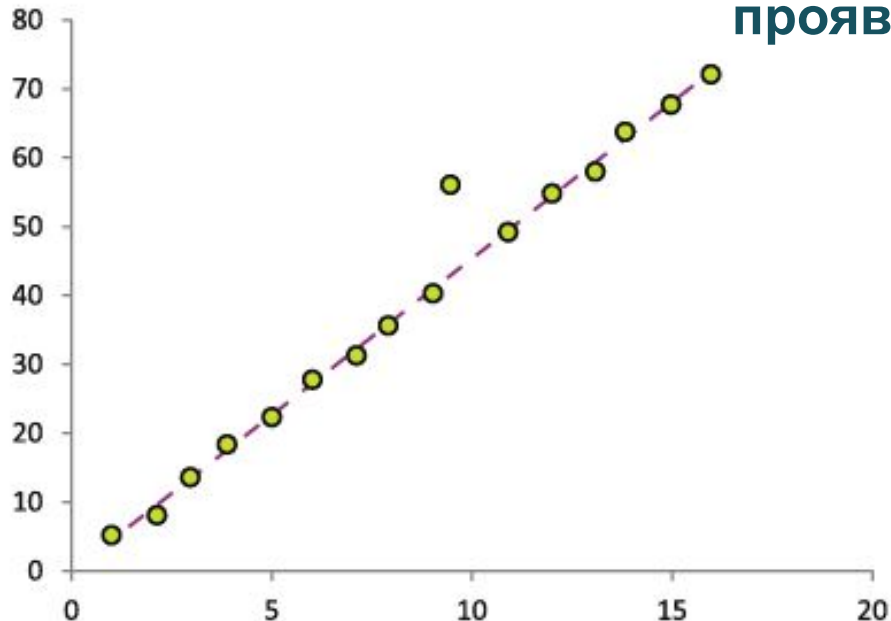
По характеру проявления

Прогрессирующая (дрейфовая) погрешность – это непредсказуемая погрешность, медленно меняющаяся во времени. Изменение во времени прогрессирующих погрешностей собой представляет нестационарный случайный процесс. Прогрессирующие погрешности могут быть скорректированы поправками только в данный момент времени, а далее вновь непредсказуемо изменяются.

Грубая погрешность (промах) – это случайная погрешность результата отдельного наблюдения, входящего в ряд измерений; для данных условий она резко отличается от остальных результатов этого ряда.

Классификация погрешностей

По характеру
проявления



Расчет сопротивления
элемента электрической цепи:

$$R_x = \frac{U}{(I - U / R_V)}$$

Наличие промаха в результатах наблюдений

Классификация погрешностей

По зависимости абсолютной погрешности
от значений измеряемой величины

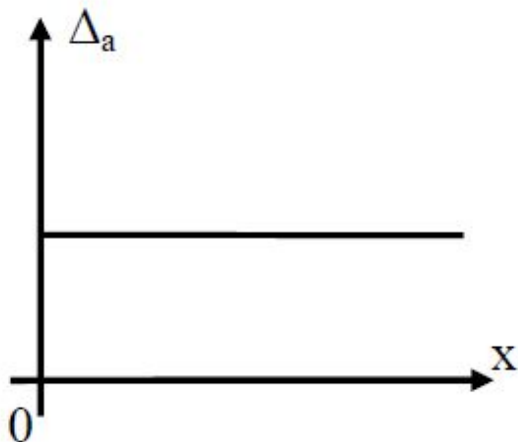
Аддитивн
ые

Мультипликативн
ые

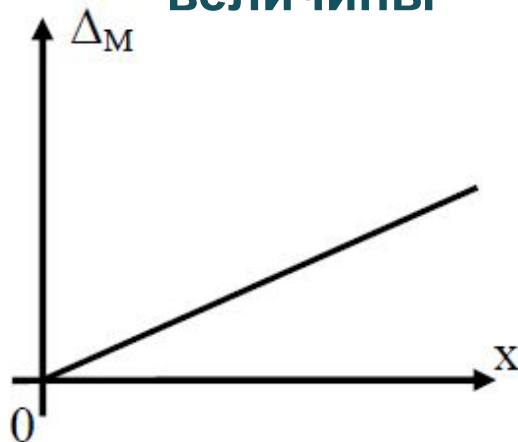
Нелинейн
ые

Классификация погрешностей

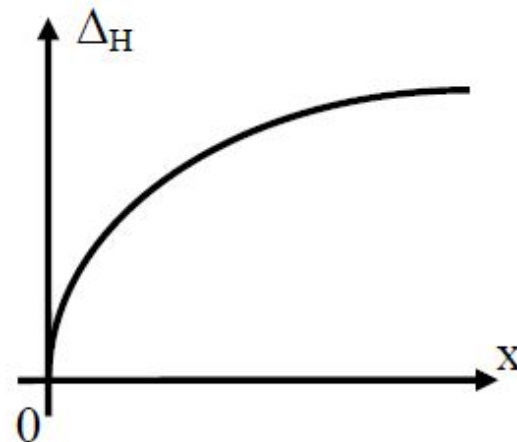
По зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины



Аддитивные погрешности (не зависят от измеряемой величины)



Мультипликативные погрешности (прямо пропорциональны измеряемой величине)



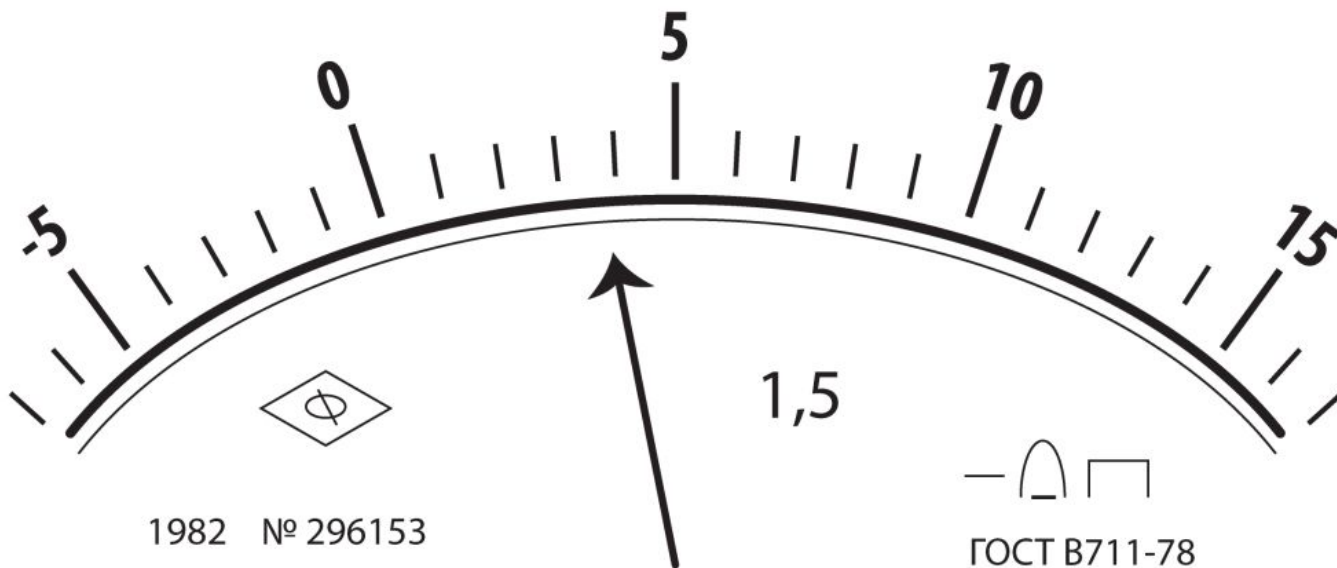
Нелинейные погрешности (зависят от измеряемой величины нелинейно)

Классификация погрешностей

| Формула для определения пределов допускаемой погрешности | Примеры пределов допускаемой основной погрешности | Обозначение класса точности | |
|--|---|-----------------------------|--------------|
| | | В документах | На средствах |
| <i>Абсолютная погрешность</i> | | | |
| $\Delta = \pm a$ | $\Delta = \pm 2 \text{ Гц}$ | Класс точности М | М |
| $\Delta = \pm(a + bX)$ | $\Delta = \pm(2 + 0,03f) \text{ Гц}$ | Класс точности С | С |
| <i>Приведенная погрешность</i> | | | |
| $\gamma = \pm \frac{100 \Delta }{X_N} \% = \pm p\%$ | $\gamma = \pm 1,5\%$ | Класс точности 1,5 | 1,5 |
| | $\gamma = \pm 0,5\%$ | Класс точности 0,5 | 0,5 |
| <i>Относительная погрешность</i> | | | |
| $\delta = \pm \frac{100 \Delta }{X} \% = \pm c\%$ | $\delta = \pm 0,5\%$ | Класс точности 0,5 | 0,5 |
| $\delta = \pm \frac{100 \Delta }{X} \% = \pm \left[c + d \left(\frac{X_k}{X} - 1 \right) \right] \%$ | $\delta = \pm [0,02 + 0,01(X_k / X) - 1] \%$ | Класс точности 0,02/0,01 | 0,02/0,01 |

Классификация погрешностей

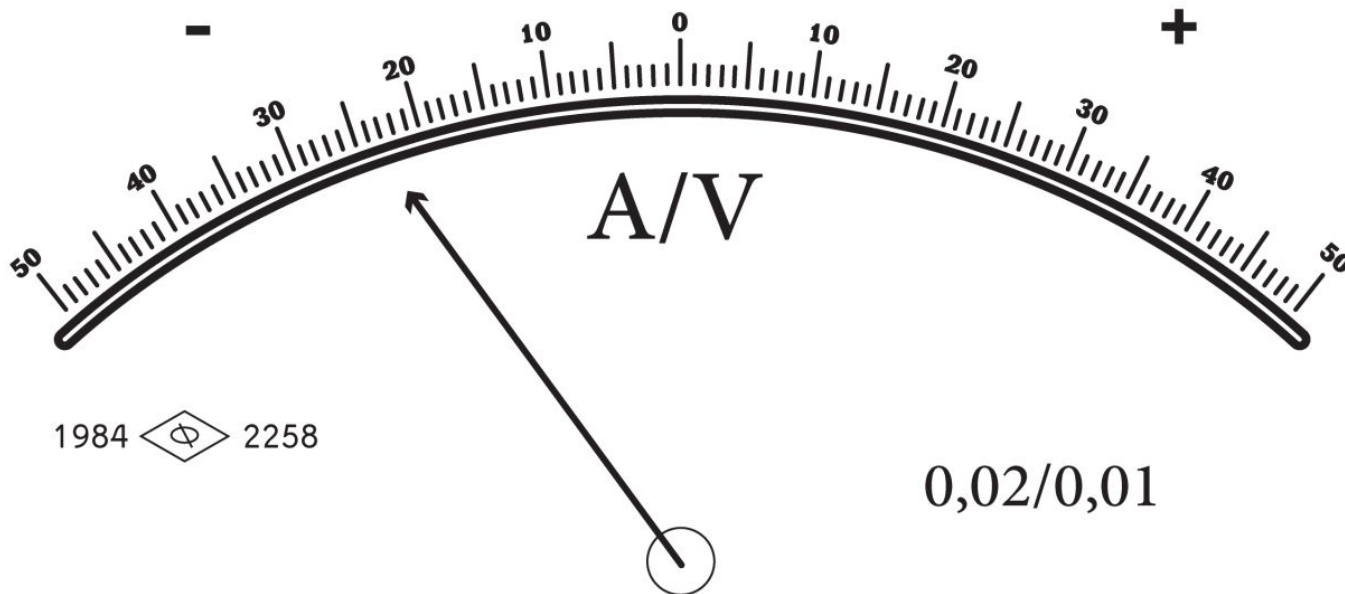
Обозначение классов точности



*Лицевая панель амперметра
класса точности 1,5 с равномерной шкалой*

Классификация погрешностей

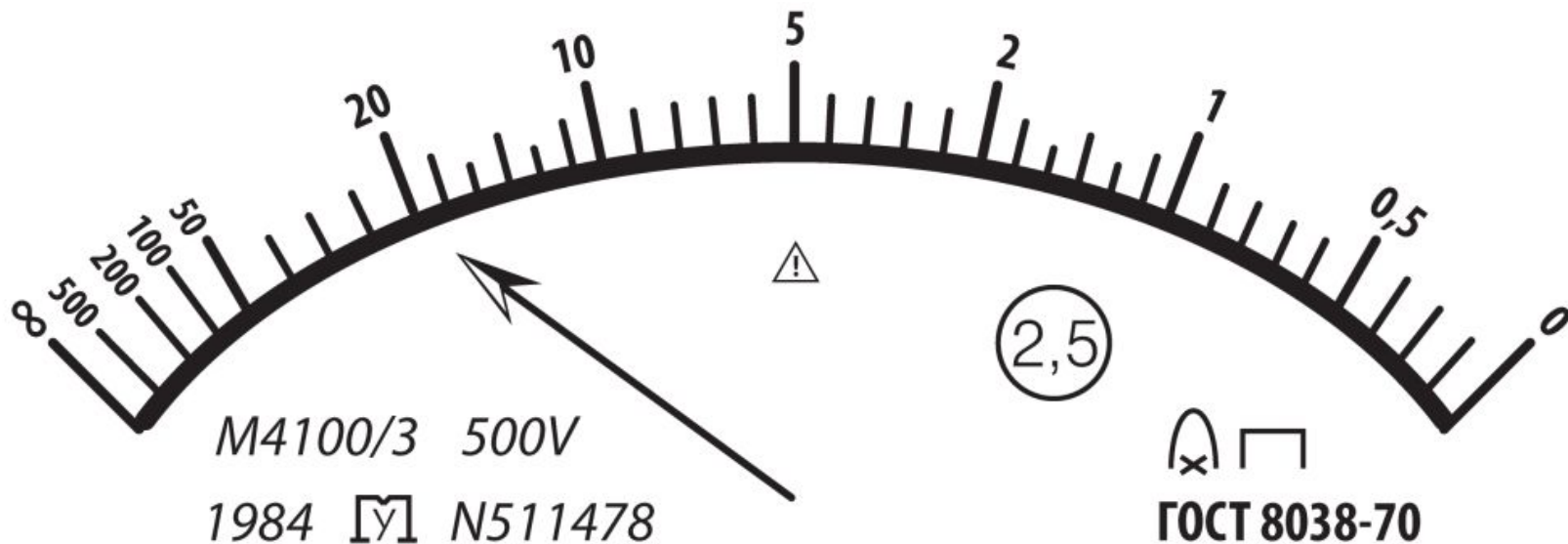
Обозначение классов точности



*Лицевая панель ампервольтметра
класса точности 0,02/0,01 с равномерной шкалой*

Классификация погрешностей

Обозначение классов точности



Лицевая панель мегаомметра класса точности 2,5

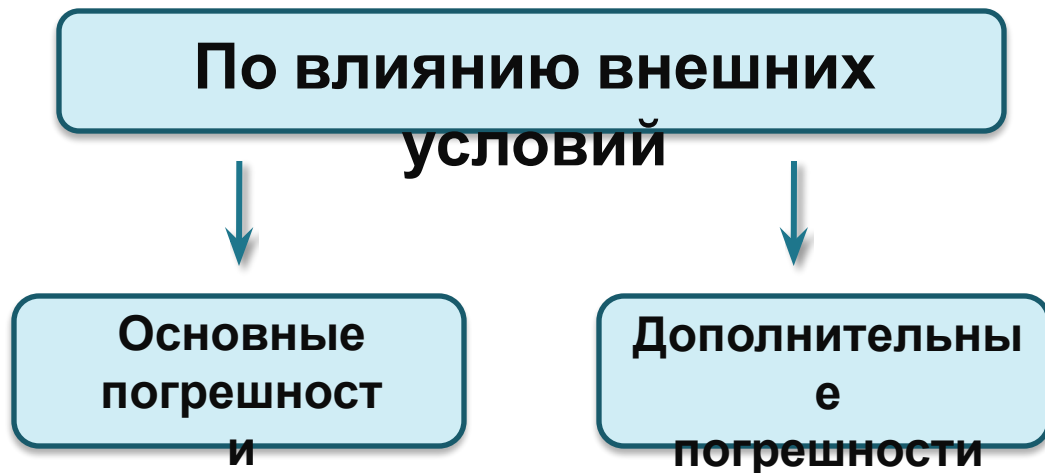
Классификация погрешностей

Обозначение классов точности



*Лицевая панель фазометра класса точности 1,0
с существенно неравномерной шкалой*

Классификация погрешностей



Классификация погрешностей

По влиянию внешних условий

Основная погрешность средства измерений – погрешность средства измерения, применяемого в нормальных условиях. Для каждого средства оговариваются условия эксплуатации, при которых нормируется его погрешность.

Дополнительная погрешность средства измерений – составляющая погрешности средства измерения, возникающая дополнительно к основной погрешности, вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

Классификация погрешностей

По влиянию внешних условий

Нормальные условия, как правило, подразумевают выполнение в ходе измерений следующих условий:

- температура окружающей среды (20 ± 5) °С;
- относительная влажность (60 ± 15) %;
- напряжение питания сети $(220,0 \pm 4,4)$ В;
- частота питания сети (50 ± 1) Гц;
- отсутствие внешних электрических и магнитных полей;
- положение прибора горизонтальное, в пределах $\pm 2^\circ$.

$\hat{X} = X + 0,01X$ – значение измеренного напряжения при нормальной температуре

Классификация погрешностей

По влиянию внешних условий

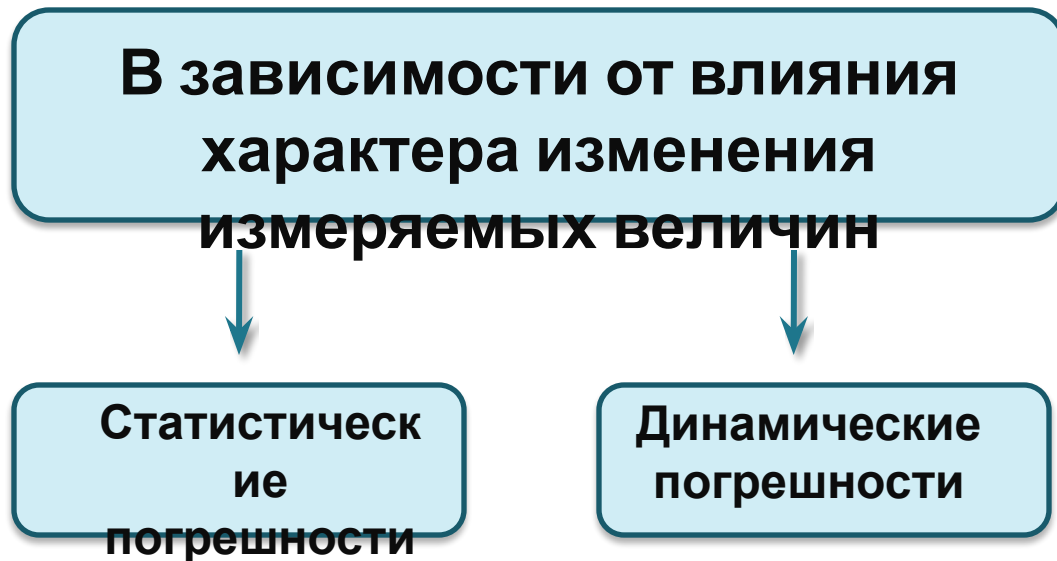
$$\Delta X_{\text{доп}} = X \left(\frac{T}{T_{\text{норм}}} - 1 \right),$$

– дополнительная погрешность, возникающая при отклонении нормального значения температуры более чем на 10 °С

$$\hat{X} = X + 0,01X + X \left(\frac{T}{T_{\text{норм}}} - 1 \right)$$

– значение измеренного напряжения при температуре, выходящей за пределы нормальной

Классификация погрешностей



Классификация погрешностей

В зависимости от влияния характера изменения измеряемых величин

Статическая погрешность средства измерений – погрешность средства измерений, применяемого при измерении физической величины, принимаемой за неизменную.

Динамическая погрешность средства измерений – погрешность средства измерений, возникающая при измерении изменяющейся (в процессе измерений) физической величины.

Правила представления результатов

Значащие цифры данного измерения – все цифры, кроме нуля слева. При этом нули, следующие из множителя 10^n (n – целое число), не учитываются.

Пример:

0,2396 – 4 значащие цифры, первая цифра – 2;

0,00173 – 3 значащие цифры, первая цифра – 1;

30170 – 5 значащих цифр, первая цифра – 3, последний нуль – также значащая цифра;

$301,7 \cdot 10^2$ – 4 значащие – цифры, первая цифра – 3, последняя – 7;

20000 – 5 значащих цифр, первая цифра – 2, все последующие нули – также значащие цифры;

$20 \cdot 10^3$ – 2 значащие цифры, первая цифра – 2, вторая цифра – 0, нули, следующие из множителя 10^3 , не учитывают;

$0,02 \cdot 10^6$ – одна и единственная значащая цифра – 2

Правила представления результатов измерений

Значащие цифры приближенного числа называются **верными**, если абсолютная погрешность приближенного числа не превышает единицы последнего разряда.

Примеры:

1. Плотность ртути $13,5975 \text{ г/см}^3$. Округлим это значение до сотых: $13,60 \text{ г/см}^3$.

Абсолютная погрешность округления $\Delta X = 0,0045 \leq 0,01$.

2. Получен результат измерения (140 ± 5) . Цифра «0» не будет верной, так как абсолютная погрешность больше единицы последнего разряда.

Правила представления результатов

Стандарт ~~СВ СТ 001~~ 543-77 измерений

1. В случае, если первая из отбрасываемых цифр (считая слева направо) меньше 5, то последняя сохраняемая цифра не меняется. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются.

| <i>До округления:</i> | <i>После округления:</i> |
|-----------------------|--------------------------|
| 3,4824 | 3,48 |
| 285,3 | 285 |
| 22,482 | 20 |
| 19,2400 | 19,24 |

Правила представления результатов

Стандарт СЭВ СТ СЭВ 543-77 измерений

2. В случае, если первая из отбрасываемых цифр (считая слева направо) больше 5, либо 5, и после нее идут другие цифры, то последняя сохраняемая цифра увеличивается на единицу.

| <i>До округления:</i> | <i>После округления:</i> |
|-----------------------|--------------------------|
| 6783,6 | 6784 |
| 12,34701 | 12,35 |
| 12,452 | 12,5 |
| 19,98281 | 20,0 |

Правила представления результатов

Стандарт СОВ СТ СЭВ измерений

543-77

3. В случае, если первая из отбрасываемых цифр равна 5 и она является крайней справа либо за ней идут нули, то последняя сохраняемая цифра увеличивается на единицу. Если отбрасываемая цифра получилась в результате предыдущего округления в большую сторону, то последняя сохраняемая цифра сохраняется. Если отбрасываемая цифра получилась в результате предыдущего округления в меньшую сторону, то последняя оставшаяся цифра увеличивается на единицу.

| <i>До округления:</i> | <i>Предыдущий этап</i> | <i>После округления:</i> |
|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| 0,145 | - | 0,15 |
| 0,15 | 0,149 | 0,1 |
| 0,25 | 0,252 | 0,3 |

Правила представления результатов

Стандарт СЭВ СТ СЭВ 543-77 измерений

4. При записи результата измерения на первом этапе округляются погрешности измерений. Округление выполняется по следующему правилу: если первая значащая цифра — единица или двойка, то после округления оставляют две значащие цифры. Если же первая значащая цифра — тройка и более, то оставляют одну значащую цифру.

| <i>До округления:</i> | <i>После округления:</i> |
|-----------------------|---|
| 0,17295 | 0,17 |
| 4,8329 | 5 |
| 0,97283 | 1,0 |
| 0,006298 | 0,006 или $0,6 \cdot 10^{-2}$ или $6 \cdot 10^{-3}$ |

Правила представления результатов

Стандарт СОВ СТ СЭВ 543-77 измерений

5. Далее округляется само числовое значение ФВ, причем ее количество знаков после запятой должно совпадать с количеством знаков после запятой для погрешности.

| <i>До округления:</i> | <i>После округления:</i> |
|-----------------------|--------------------------|
| 3,4874±0,17295 | 3,49±0,17 |
| 285,396±4,8329 | 285±5 |
| 12,482±0,97283 | 12,5±1,0 |
| 19,98281±0,8138 | 20,0±0,8 |

Правила представления результатов

Стандарт СЭВ СТ СЭВ 543-77 измерений

6. Если при округлении погрешности указан порядок, т.е. 10^n , то такой же порядок должен быть и у самой величины, при этом оба числа заключаются в скобки, и множитель 10^n указывается один раз.

| <i>До округления:</i> | <i>После округления:</i> |
|-----------------------|---|
| 0,283984±0,006298 | 0,284±0,006 или $(28,4±0,6)·10^{-2}$ или $(284±6)·10^{-3}$ |
| 72903±384,53 | 72900±400 или $(72,9±0,4)·10^3$ или $(729±4)·10^2$ |
| 2374±48 | 2370±50 или $(2,37±0,05)·10^3$ или $(23,7±0,5)·10^2$ |

Правила представления результатов

Арифметические операции с приближенными числами

Возведение в степень и извлечение корня

При возведении в степень приближенного числа следует сохранить в результате столько десятичных знаков, сколько их у исходного числа.

Пример: $(3,4 \cdot 10^2)^3 = 39304000 \approx 3,9 \cdot 10^7$

Сложение и вычитание

При сложении и вычитании приближенных чисел сохраняется столько десятичных знаков, сколько их имеет слагаемое с минимальным количеством.

Пример: $5,14 + 12,1 + 6,353 = 23,593 \approx 26,6$

Умножение и деление

При умножении и делении приближенных чисел сохраняется столько десятичных знаков, сколько имеет приближенное число с минимальным количеством.

Пример: $1,5 \cdot 35 = 52,5 \approx 52$

Примеры заданий

1. Число 83,26 найдено с относительной погрешностью 0,3%. Найти абсолютную погрешность округления.

Примеры заданий

1. Число 83,26 найдено с относительной погрешностью 0,3%. Найти абсолютную погрешность округления.

Относительная погрешность $\delta = \frac{\Delta X}{X}$

В нашем случае $\delta = 0,3\%$, $X = 83,26$, отсюда $\Delta X = (X \cdot \delta) / 100\%$

Получаем $\Delta X = 0,24978$

Примеры заданий

2. Найти абсолютные и относительные погрешности числа $e = 2,71828182\dots$, заданного двумя и тремя цифрами после запятой.

Примеры заданий

2. Найти абсолютные и относительные погрешности числа $e = 2,71828182\dots$, заданного двумя и тремя цифрами после запятой.

*Две цифры после
запятой*
 $X = 2,72$

$$\Delta X = 0,0017118\dots \approx 0,0017$$

$$\delta = \frac{0,0017}{2,72} \cdot 100\% \approx 0,06\%$$

*Три цифры после
запятой*
 $X = 2,718$

$$\Delta X = 0,0002818\dots \approx 0,00028$$

$$\delta = \frac{0,00028}{2,718} \cdot 100\% \approx 0,010\%$$

Примеры заданий

3. Округлить число $x = 4,45575250$ до шести, пяти и т.д. десятичных знаков и до целого числа.

Примеры заданий

3. Округлить число $x = 4,45575250$ до шести, пяти и т.д. десятичных знаков и до целого числа.

$x = 4,45575250$ – исходное число

$x \approx 4,4557526$ – правило 3 округления чисел

$x \approx 4,455753$ – правило 2 округления чисел

$x \approx 4,45575$ – правило 1 округления чисел

$x \approx 4,4558$ – правило 3 округления чисел

$x \approx 4,456$ – правило 2 округления чисел

$x \approx 4,46$ – правило 2 округления чисел

$x \approx 4,5$ – правило 2 округления чисел

$x \approx 4$ – правило 3 округления чисел

Примеры заданий

4. Вычислить верные значащие цифры чисел.

$$X = 0,004507 \text{ при } \Delta = 0,00006$$

$$X = 12,396 \text{ при } \Delta = 0,03.$$

$$X = 0,037862 \text{ при } \Delta = 0,007$$

Примеры заданий

4. Вычислить верные значащие цифры чисел.

$X = 0,004507$ при $\Delta = 0,00006$. $0,00006 < 0,0001$, следовательно, значащими цифрами будут $X = \underline{0,004507}$

$X = 12,396$ при $\Delta = 0,03$. $0,03 < 0,1$, следовательно, значащими цифрами будут $X = \underline{12,396}$

$X = 0,037862$ при $\Delta = 0,007$. $0,007 < 0,01$, следовательно, значащими цифрами будут $X = \underline{0,037862}$

Примеры заданий

5. Получено значение физической величины $2,32540874$ с погрешностью $0,162875$. Записать результат согласно правилам представления погрешностей.

Примеры заданий

5. Получено значение физической величины $2,32540874$ с погрешностью $0,162875$. Записать результат согласно правилам представления погрешностей.
- Округляем погрешность до двух значащих цифр: $0,16$;
 - Округляем результат так, чтобы последняя значащая находилась на той же позиции, что и последняя значащая цифра погрешности: $2,33$;
 - Результат: $2,33 \pm 0,16$

Оценка погрешностей при косвенных измерениях

Пусть представляющая интерес величина ξ является функцией ряда непосредственно измеримых величин x, y, z, \dots

$$\xi = f(x, y, z, \dots)$$

Для абсолютных погрешностей справедливы соотношения:

$$|\Delta X| \ll X, \quad |\Delta Y| \ll Y, \quad |\Delta Z| \ll Z \dots$$

Примем погрешность за малое приращение измеряемой величины:

$$\Delta X \approx dX, \quad \Delta Y \approx dY, \quad \Delta Z \approx dZ \dots \quad \Delta \xi \approx d\xi$$

Оценка погрешностей при косвенных измерениях

Рассмотрим частные производные функции ξ :

$$\Delta\xi = \left| \frac{\partial f}{\partial X} \cdot \Delta X \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial Y} \cdot \Delta Y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial Z} \cdot \Delta Z \right| + \dots$$

Слагаемое $\Delta\xi_X = \left| \frac{\partial f}{\partial X} \cdot \Delta X \right|$ соответствует погрешности, которую вносит в погрешность $\Delta\xi$ неточность измерения величины X .

Оценка погрешностей при косвенных измерениях

Формулы расчета погрешностей для ряда наиболее часто встречающихся функций

(1)

| $\xi = f(X, Y)$ | $\Delta\xi$ | $\delta_\xi = \frac{\Delta\xi}{\xi}$ |
|-----------------|---------------------------------------|---|
| $X + Y$ | $\Delta X + \Delta Y$ | $\frac{\Delta X + \Delta Y}{X + Y}$ |
| $X - Y$ | $\Delta X + \Delta Y$ | $\frac{\Delta X + \Delta Y}{ X - Y }$ |
| $X \cdot Y$ | $\Delta X \cdot X + \Delta Y \cdot Y$ | $\frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y} = \delta_X + \delta_Y$ |

Оценка погрешностей при косвенных измерениях

Формулы расчета погрешностей для ряда наиболее часто встречающихся функций

| $\xi = f(X, Y)$ | $\Delta \xi$ | $\delta_\xi = \frac{\Delta \xi}{\xi}$ |
|-----------------|---|--|
| X / Y | $\frac{\Delta X \cdot X + \Delta Y \cdot Y}{Y^2}$ | $\frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta Y}{Y} = \delta_X + \delta_Y$ |
| X^n | $ n \cdot X^{n-1} \Delta X$ | $ n \cdot \frac{\Delta X}{X} = n \cdot \delta_X$ |
| $\sqrt[n]{X}$ | $\left \frac{1}{n} \right \cdot X^{\frac{1}{n}-1} \Delta X$ | $\left \frac{1}{n} \right \cdot \frac{\Delta X}{X} = \frac{1}{n} \cdot \delta_X$ |

Примеры заданий

1. Размеры прямоугольника составляют $a=3,3\pm 0,1$ см и $b=5,2\pm 0,1$ см. Найти площадь и периметр прямоугольника

Периметр прямоугольника: $p = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (3,3 + 5,2) = 17$

Абсолютная погрешность: $\Delta p = 2 \cdot (\Delta a + \Delta b) = 2 \cdot (0,1 + 0,1) = 0,4$

Относительная погрешность: $\delta p = \frac{\Delta X + \Delta Y}{X + Y} = \frac{0,1 + 0,1}{3,3 + 5,2} = 0,0235294117... \approx 0,024$

Ответ: периметр прямоугольника составляет $17,0\pm 0,4$ см, $\delta=2,4\%$.

Примеры заданий

1. Размеры прямоугольника составляют $a=3,3\pm 0,1$ см и $b=5,2\pm 0,1$ см. Найти площадь и периметр прямоугольника

Площадь прямоугольника: $s = a \cdot b = 3,3 \cdot 5,2 = 17,16$

Относительная погрешность: $\delta s = \delta_a + \delta_b = \frac{0,1}{3,3} + \frac{0,1}{5,2} = 0,049261 \approx 0,050$

Абсолютная погрешность: $\Delta s = \Delta s \cdot s = 17,16 \cdot 0,050 = 0,858 \approx 0,9$

Ответ: площадь прямоугольника составляет $17,2\pm 0,9$ см², $\delta=5\%$.

Примеры заданий

2. Дан цилиндр массой $m=60,01\pm 0,01$ г, диаметром $d=25,010\pm 0,005$ мм и высотой $h=30,000\pm 0,005$ мм. Найти плотность цилиндра.

$$\text{Плотность цилиндра: } \rho = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d^2 \cdot h} = \frac{4 \cdot 60,01}{\pi \cdot (25,01)^2 \cdot 30} = 4073,8 \text{ кг / м}^3$$

Найдем логарифм от выражения плотности цилиндра:

$$\ln \rho = \ln 4 - \ln \pi + \ln m - 2 \ln d - \ln h$$

Возьмем дифференциал:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta m}{m} + 2 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta h}{h} = \delta_m + 2\delta_d + \delta_h = \delta_\rho$$

Примеры заданий

2. Дан цилиндр массой $m=60,01\pm 0,01$ г, диаметром $d=25,010\pm 0,005$ мм и высотой $h=30,000\pm 0,005$ мм. Найти плотность цилиндра.

Относительная погрешность:

$$\delta_{\rho} = \delta_m + 2\delta_d + \delta_h = \frac{0,01}{60,01} + 2\frac{0,005}{25,01} + \frac{0,005}{30} = 0,07\%$$

Абсолютная погрешность: $\Delta\rho = \delta_{\rho} \cdot \rho = 4073,8 \cdot 0,0007 = 2,9 \text{ кг} / \text{м}^3$

Плотность цилиндра составляет $4073,8\pm 2,9 \text{ кг} / \text{м}^3$