

# МЕТРОЛОГИЯ И ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

---

Лекция 7. Метрологические характеристики средств измерений

# Основные понятия

Все СИ, независимо от их использования, обладают рядом свойств, которые описываются различными характеристиками. Среди большого количества характеристик СИ особое место занимают метрологические характеристики – характеристики, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений.

Комплекс метрологических характеристик, устанавливаемых в нормативной документации на СИ конкретного типа, называется нормируемыми метрологическими характеристиками, которым предписывается определенное числовое значение.

Выбор и нормирование метрологических характеристик СИ проводятся в соответствии с ГОСТ 8.009.84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений», устанавливающий номенклатуру метрологических характеристик СИ.

| <i>Группа характеристик</i>                             | <i>Характеристики</i>   |
|---|---|
| Характеристики для определения результатов измерений    | Функция преобразования<br>Значения меры<br>Цена деления<br>Кодовые характеристики         |
| Характеристики погрешностей СИ                          | Систематическая составляющая<br>Случайная составляющая<br>Вариация выходного сигнала СИ   |
| Характеристики чувствительности СИ к влияющим величинам | Функция влияния<br>Изменение метрологических характеристик при изменении влияющих величин |
| Динамические характеристики СИ                          | Полные<br>Частные   |
| Характеристики взаимодействия СИ                        | Входной импеданс<br>Выходной импеданс   |
| Неинформативные параметры выходного сигнала             | Например, $U_m$ для частотомера   |

# Характеристики, определяющие результат измерений. Функция преобразования

**Функция преобразования** (статическая характеристика преобразования) – функциональная зависимость информационного параметра выходного сигнала СИ от информативного параметра его входного сигнала:

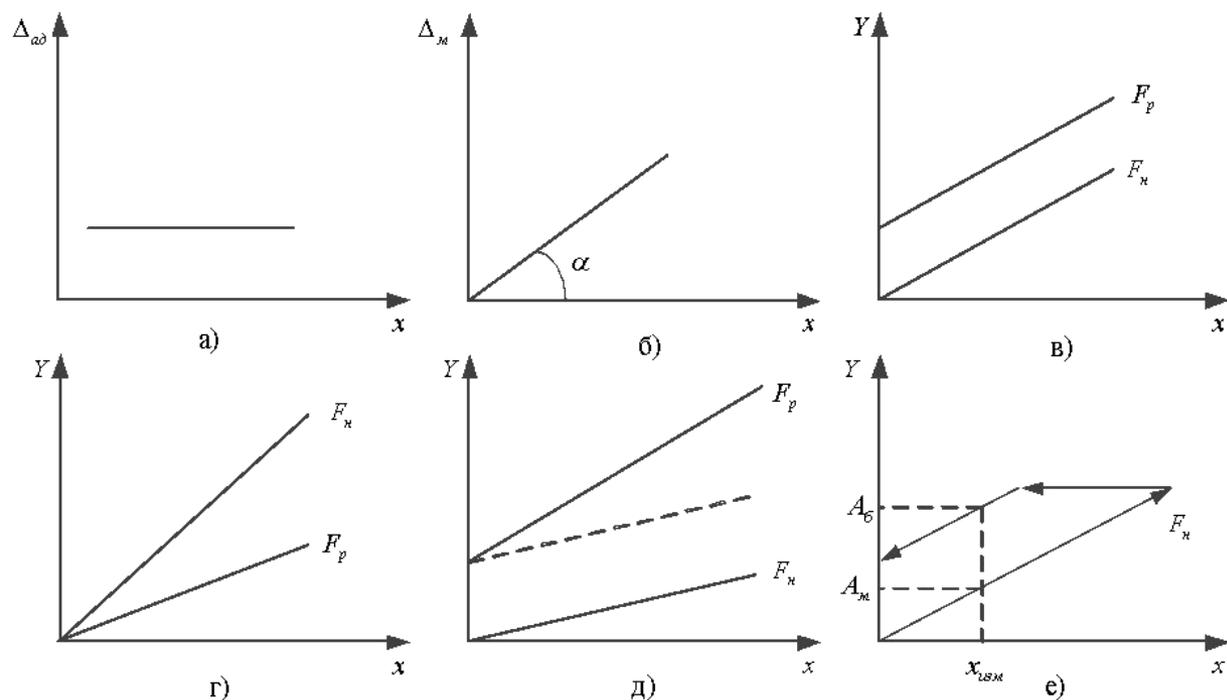
$$Y = F(x)$$

Функция преобразования позволяет определить значения измеряемой величины  $x$  в рабочих условиях по показанию СИ  $Y$ , если измерительный прибор имеет неименованную шкалу или шкалу, отградуированную в единицах входной величины.

Функцию преобразования, установленную в нормативной документации на данное средство измерений (тип), называют **номинальной функцией преобразования**. Номинальную функцию преобразования представляют в виде уравнения, таблицы, графика. Для аналоговых измерительных приборов задание функции преобразования (градуировочной характеристики) означает градуировку шкалы прибора, т.е. нанесение отметок на шкалу прибора. Для цифровых измерительных приборов градуировочная характеристика представляется в виде натуральной последовательности чисел, высвечиваемых на табло.

# Характеристики, определяющие результат измерений. Функция преобразования

Графическое представление номинальной функции преобразования ( $F_n$ ) и реальной ( $F_p$ ) с учетом воздействия аддитивной ( $\Delta_{ад}$ ) и линейной мультипликативной ( $\Delta_m$ ) погрешностей показано на рисунке



При наличии аддитивной погрешности ( ) прямая параллельна прямой , а при наличии мультипликативной погрешности ( ) наклон реальной функции преобразования отличается от наклона графика номинальной функции.

# Характеристики, определяющие результат измерений

Значения однозначной или многозначной меры используются в качестве характеристик для устройств, применяемых в качестве мер.

Значение  $Y$  однозначной или значение  $Y_i$  многозначной меры определяются соответствующими значениями воспроизводимых данной мерой физических величин. Например, у кварцевого генератора нормируется номинальное значение частоты колебаний на его выходе.

Цена деления шкалы – модуль разности значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. При неравномерной шкале за цену деления берется минимальная цена деления.

Для СИ, выдающих результаты измерений в цифровом коде, указывают характеристики цифрового кода: цену единицы младшего разряда (единицы младшего разряда цифрового отсчетного устройства), вид выходного кода (двоичный или двоично-десятичный) и число разрядов кода.

Цена единицы младшего разряда кода определяется значением измеряемой величины, приходящимся на единицу дискретности, т.е. фактически является аналогом разрешающей способности СИ, имеющих стрелочные отсчетные устройства.

# Характеристики, определяющие результат измерений

Чувствительность измерительного прибора – это отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Абсолютная чувствительность определяется формулой

$$S = \frac{\Delta_y}{\Delta_x}$$

относительная чувствительность

$$S = \frac{\Delta_y}{(\Delta_x / x)}$$

где  $\Delta_y$  – изменение сигнала на выходе;  $\Delta_x$  – изменение измеряемой величины;  $x$  – измеряемая величина.

При нелинейной статической характеристике преобразования чувствительность зависит от  $x$ , а при линейной характеристике чувствительность постоянна.

Чувствительность измеряется в различных единицах, например, чувствительность канала отклонения луча осциллографа может измеряться в миллиметрах на вольт.

Иногда для характеристики измерительных приборов используется понятие порога чувствительности, под которым понимается наименьшее изменение измеряемой величины, вызывающее изменение показания прибора, различаемое без дополнительных устройств. Порог чувствительности цифровых приборов совпадает с единицей младшего разряда.

# Характеристики, определяющие результат измерений

Диапазон показаний — это область значений измеряемой величины, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы.

Диапазон измерений определяет область значений измеряемой величины, для которой нормированы допустимые погрешности СИ. Диапазон измерений ограничивается наибольшим ( $x_{\max}$ ) и наименьшим ( $x_{\min}$ ) значениями диапазона, т.е. диапазон измерений имеет предел измерений. Часто в измерительных приборах с целью повышения точности измерений общий диапазон измерений делят на несколько частных, такие приборы называют многопредельными.

Если нижним пределом измерений является нуль, то их обычно характеризуют только верхним пределом диапазона измерений.

# Характеристики, определяющие результат измерений

**Отсчет** — число, определенное по отсчетному устройству прибора.

**Показание прибора** — значение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины. В некоторых случаях показание определяется с помощью отсчета по прилагаемой к прибору градуировочной характеристике — зависимости между отсчетом и значением величины на входе прибора, представленной в виде таблицы, графика или формулы.

**Длина деления шкалы** — расстояние между осями двух соседних отметок.

Шкалы бывают:

- равномерные – шкалы с постоянной длиной деления;
- практически равномерные — шкалы, длины делений которой различаются не более чем на 30%, а цена делений постоянна;
- степенные – шкалы с расширяющимися или сужающимися по степенному закону делениями;
- существенно неравномерные – шкалы с сужающимися делениями, для которой значение выходного сигнала, соответствующее полусумме верхнего и нижнего пределов диапазона, находится в интервале между 65 и 100 % длины шкалы, соответствующей полному диапазону измеряемой величины.

# Характеристики погрешностей средств измерений

Погрешности СИ можно классифицировать по ряду признаков.

Абсолютная погрешность средства измерений (измерительного прибора) – это разность между показанием измерительного прибора  $x_n$  и действительным  $x_o$  значением измеряемой им величины:

$$\Delta = x_n - x_o$$

Абсолютные погрешности, не зависящие от измеряемой величины, называют аддитивными, а зависящие от измеряемой величины – мультипликативными. Абсолютные мультипликативные погрешности могут быть линейными и нелинейными.

Относительная погрешность измерительного прибора – это отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к действительному значению измеряемой им величины:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_o} \cdot 100\%$$

Приведенная погрешность средства измерений — отношение погрешности измерительного прибора к нормирующему значению ( $x_n$ ). Под нормирующим значением понимается условно принятое значение, которое в общем случае зависит от характера шкалы и расположения нулевой отметки на шкале. Приведенную погрешность обычно выражают в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_n} \cdot 100\%$$

# Характеристики погрешностей средств измерений.

## Систематическая погрешность

Систематическая погрешность средств измерений – это составляющая погрешности, остающаяся постоянной или закономерно изменяющейся величиной. Она определяется как разность между  $F_n$  и  $F_p$ .

Причинами возникновения систематических погрешностей могут быть:

- действие различных дестабилизирующих факторов в процессе измерения;
- технологические ошибки в процессе изготовления СИ;
- ошибки при подготовке измерительных приборов к проведению измерений;
- старение и износ конструктивных элементов СИ.

Систематическую погрешность можно считать постоянной или закономерно изменяющейся величиной только для одного экземпляра СИ. Реально в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 8.009-84) систематическая погрешность определяется для совокупности СИ одного типа. Следовательно, систематические погрешности каждого экземпляра будут случайным образом отличаться друг от друга, а систематическая погрешность всей совокупности СИ рассматривается как случайная величина.

# Характеристики погрешностей средств измерений.

## Систематическая погрешность

Систематическая погрешность может оцениваться с использованием следующих показателей (характеристик):

- значение  $\Delta_{os}$  систематической составляющей основной погрешности СИ;
- математическое ожидание  $M[\Delta_{os}]$  систематической составляющей основной погрешности СИ;
- среднее квадратическое отклонение  $\sigma[\Delta_{os}]$  систематической составляющей основной погрешности СИ.

При оценивании погрешностей СИ характер изменения систематической составляющей погрешности не всегда можно определить, но при этом оказываются известными границы, в которых она может находиться, следовательно, учитывать такую погрешность можно как случайную, изменяющуюся по неизвестному закону.

В общем случае систематическая составляющая погрешности СИ зависит от времени, т.е.  $\Delta_{os}(t)$ ,  $M[\Delta_{os}](t)$ ,  $\sigma[\Delta_{os}](t)$ , однако в течение небольшой продолжительности обычных измерений ее принято считать постоянной.

Характеристики  $M[\Delta_{os}]$  и  $\sigma[\Delta_{os}]$ , характеризующие систематическую составляющую по совокупности СИ, могут нормироваться. Нормируется также предел допускаемой систематической составляющей погрешности:

$$\Delta_{osp} = M[\Delta_{os}] + K(P)\sigma[\Delta_{os}]$$

где  $K(P)$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и законом распределения.

# Характеристики погрешностей средств измерений.

## Случайная погрешность

Случайная погрешность средств измерений – это составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом. Причинами случайных погрешностей могут быть:

- случайные изменения параметров конструктивных элементов СИ;
- случайное изменение отсчета по шкале прибора .

Характеристики случайной составляющей погрешности СИ:

- среднее квадратическое отклонение  $\sigma(\overset{\circ}{\Delta})$ ;
- нормированная автокорреляционная функция;
- $\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$  – случайная составляющая, вызванная гистерезисом, которая обусловлена отличием (вариацией) показаний конкретного экземпляра СИ от значения параметра измеряемого сигнала при различных скоростях и направлениях его изменения.

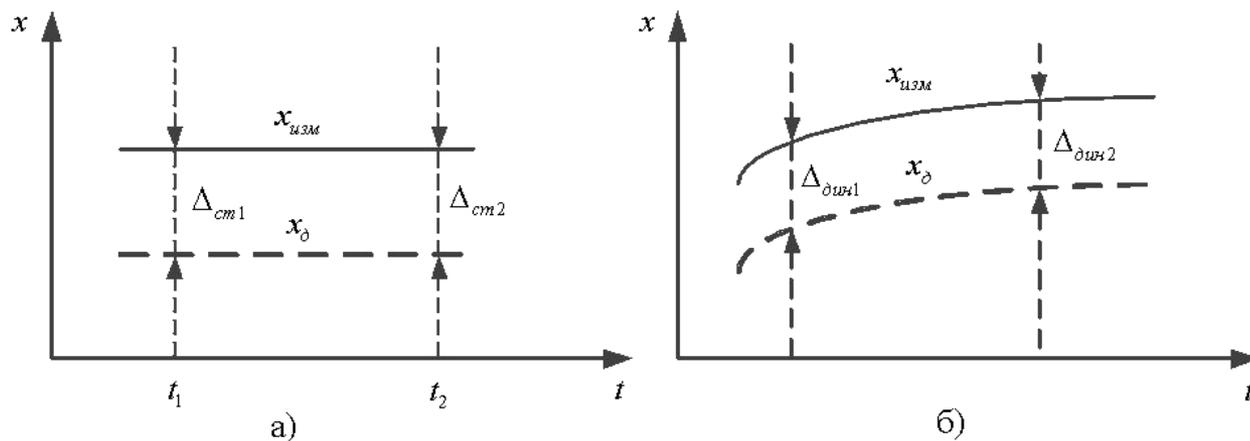
Для  $\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$  нормируется предел допускаемой вариации выходного сигнала  $H_{0P}$ . В пределах от нуля до  $H_{0P}$  случайная погрешность от гистерезиса  $\overset{\circ}{\Delta}_{0H}$  обычно принимается распределенной по равномерному закону.

# Характеристики погрешностей средств измерений.

## Статическая и динамическая погрешность

Статическая погрешность – это погрешность, возникающая при измерении СИ постоянной во времени физической величины. В статическом режиме измеряемая величина и выходной сигнал, по которому оценивается результат измерения, являются неизменными во времени.

Динамическая погрешность – это погрешность, возникающая при измерении изменяющейся в процессе измерения физической величины. Динамическая погрешность определяется как разность между погрешностью в динамическом режиме и статической погрешностью, соответствующей значению измеряемой величины в данный момент времени. В момент времени  $t_1$  динамическая погрешность  $\Delta_1 = \Delta_{дин1} - \Delta_{ст1}$ . Величина динамической погрешности зависит от соотношения между скоростью изменения измеряемой величины и скоростью реакции СИ на это изменение.



# Характеристики погрешностей средств измерений

**Вариация показаний** (измерительного прибора) — это различие в показаниях в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

Вариация показаний  $H_p$  вычисляется как абсолютная разность показаний в одной и той же точке шкалы при прямом (со стороны меньших величин) и обратном (со стороны больших величин) значений измеряемой величины:

$$H_p = |A_{\text{б}} - A_{\text{п}}|$$

При многократном повторении измерений берется абсолютная разность средних значений:

$$H_p = |\bar{A}_{\text{м}} - \bar{A}_{\text{б}}|$$

Вариация нормируется пределом допускаемого значения вариации СИ данного типа.

Для измерительных приборов с аналоговым отсчетным устройством основными причинами вариации показаний являются процессы трения в подшипниках или подвесках.

# Характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам

Реальные условия эксплуатации СИ могут отличаться от нормальных, в результате чего возникают дополнительные погрешности, значения которых определяются чувствительностью СИ к влияющим величинам (факторам).

Характеристиками чувствительности СИ к влияющим величинам являются:

- функция влияния  $\Psi(\xi)$ ;
- изменения  $\varepsilon(\xi)$  значений метрологических характеристик, вызванные изменениями влияющих величин в установленных пределах.

**Функция влияния**  $\Psi(\xi)$  устанавливает зависимость метрологических характеристик СИ от изменения влияющих величин в рабочих условиях применения. Чаще всего устанавливается зависимость инструментальной погрешности от изменения влияющих факторов.

Характеристики чувствительности  $\Psi(\xi)$  и  $\varepsilon(\xi)$  могут нормироваться как для каждой влияющей величины, так и для совместных изменений нескольких влияющих величин, т.е.  $\Psi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$  и  $\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ .

# Динамические характеристики средств измерений

В зависимости от характера изменения измеряемой физической величины и свойств СИ, последние могут работать в статическом или динамическом режимах.

Если СИ реагирует на изменения измеряемой физической величины во времени и преобразовательные процессы, происходящие в нем, зависят от его динамических свойств, то такой режим работы называется динамическим. При медленном изменении измеряемой физической величины или его отсутствии режим работы СИ считается статическим.

Погрешности СИ, определяемые характером изменения физической величины, также разделяют на статические и динамические.

По величине динамической погрешности принято определять режим работы СИ. В соответствии с ГОСТ 8.009-84 динамическая погрешность считается существенной и учитывается как дополнительная погрешность, а режим измерения считается динамическим, если выполняется условие

$$\Delta_{\delta \max} \geq 0.17 \Delta_{\max \text{СИ}}$$

где  $\Delta_{\delta \max}$  – максимальное значение динамической погрешности данного типа в рабочих условиях его применения;  $\Delta_{\max \text{СИ}}$  – максимально возможное значение погрешности СИ в рабочих условиях его применения.

# Динамические характеристики средств измерений

Полная динамическая характеристика однозначно определяет изменение выходного сигнала аналогового СИ при любом изменении во времени входного сигнала, влияющей величины или нагрузки.

К полным динамическим характеристикам относятся:

- передаточная функция;
- переходная характеристика;
- импульсная характеристика;
- совокупность амплитудной и фазочастотной характеристик или каждая из них в отдельности.

Для полной динамической характеристики нормируется номинальное значение и пределы допускаемых отклонений от нее. Предпочтительной из указанных является та характеристика, которую проще получить экспериментально.

# Динамические характеристики средств измерений

Частными динамическими характеристиками могут быть отдельные параметры полных динамических характеристик или характеристики, не отражающие полностью динамические свойства СИ, но необходимые для определения возможности выполнения измерений с требуемой точностью.

Для аналоговых СИ частными динамическими характеристиками являются:

- время реакции;
- постоянная времени;
- коэффициент демпфирования.

Для цифровых измерительных приборов к частным динамическим характеристикам относятся:

- время реакции;
- погрешность датирования отсчета;
- максимальная частота (скорость) измерений.

Погрешность датирования отсчета является следствием неоднозначности времени (внутри шага дискретизации входного сигнала), при котором значение изменяющейся величины оказывается равным значению выходного цифрового сигнала в соответствующем цикле преобразования.

Коэффициент демпфирования (степень успокоения) — это параметр дифференциального уравнения второго порядка, описывающего линейное СИ.

Время реакции для измерительных приборов — это время установления показаний аналоговых приборов или быстродействие для цифровых приборов.

Нормирование частных динамических характеристик проводится через номинальные значения и пределы допустимых отклонений от них.

# Характеристики взаимодействия средств измерений с объектами или устройствами на их входе и выходе

Характеристики взаимодействия СИ с объектами или устройствами на входе и выходе СИ:

- входное полное сопротивление (входной импеданс);
- выходное полное сопротивление (выходной импеданс).

Входное сопротивление влияет на мощность, потребляемую от объекта исследования. При измерениях в маломощных цепях потребление прибором относительно большой мощности может нарушить режим работы цепи.

От выходного сопротивления СИ зависит допустимая нагрузка. Чем меньше выходное сопротивление, тем больше допустимая нагрузка на СИ.