

# ГЛАВА 1. ИЗМЕРЕНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА

## 1.1. Общие сведения об измерениях и измерительных средствах

Примем, что буквенное обозначение  $x$  будет относиться к входным измеряемым, а обозначение  $y$  – к выходным измеренным величинам. Термин «измерение», в зависимости от контекста, будет трактоваться двояко: как измерительная процедура или, как численный результат измерительной процедуры.

Рассмотрим измерения с точки зрения метода получения результатов. Приведем необходимые определения и сведения, которые используются при решении задач анализа и обработки измерений.

**Многократные измерения** физической величины  $x$  образуются на основе последовательности (серии) измерений, осуществленных, как, правило, в одинаковых условиях. Указанные измерения обозначаются, как  $y_i$ ,  $i=0,1,\dots,N$ , где  $i$  – номер измерения,  $N$  – число измерений.

**Однократные измерения**, обозначаемые в виде  $y$ , для физической величины  $x$  являются частным случаем многократных измерений при  $N=1$  ( $y=y_0$ ). **Прямые измерения** физической величины  $x$ , также обозначаемые, как  $y$ , производятся непосредственно на основе показаний измерительных средств.

**Косвенные измерения** реализуются в предположении, что физическая величина  $x$ , которая является ненаблюдаемой, и значение которой необходимо определить (измерить), связана с наблюдаемыми (измеряемыми) физическими величинами  $x_s$ ,  $s=1,\dots,n$  функциональной зависимостью известного вида

$$x = G(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Пусть  $y_s$ , являются измерениями физических величин  $x_s$ , которые могут быть получены на основе процедур однократных или многократных измерений. Косвенное измерение  $y$  для величины  $x$ , достаточно часто представляется, как результат вычисления по исходной зависимости, путем замены  $x_s$ , на  $y_s$

$$y = G(y_1, y_2, \dots, y_n). \quad (1.1)$$

Например, измерение количества выделенного тепла  $Q$  при остывании тела массой  $m$ , удельной теплоемкости  $c$  от температуры  $t_1$ , до температуры  $t_2$  вычисляется на основе известной функциональной зависимости

$$Q = cm(t_1 - t_2). \quad (1.2)$$

Для физических величин  $m=x_1$ ,  $t_1=x_2$ ,  $t_2=x_3$  производятся прямые измерения  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ , физическая величина  $c=x_4$  определяется на основе ее табличного значения  $y_4$ . Величине  $Q=x$  ставится в соответствие ее косвенное измерение  $y$ , вычисляемое по (1.2) в соответствии с (1.1).

**Многомерные измерения** осуществляются для систем, состояние которых описывается совокупностью (набором) переменных физических величин. В таких системах многомерное состояние может быть представлено

вектором  $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  и многомерное (векторное) измерение для состояния записывается в виде  $y^T = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ .

Измерения могут быть классифицированы по виду измеряемых физических величин. Для систем автоматизации, холодильной техники, машин и оборудования пищевой промышленности и отраслей АПК измерения удобно сгруппировать следующим образом:

- Теплофизические измерения, состоящие из измерений температуры, тепловых потоков, количеств тепла, теплоемкостей, коэффициентов теплопроводности и теплопередачи, холодопроизводительности т.д.;

- Механические измерения, включающие измерения масс, плотностей веществ, расходов протекающих веществ, сил, давления, механических напряжений, энергии, мощностей, перемещений, скоростей (линейных и угловых), ускорений, частот вращения, смещений уровней раздела сред и т.д.;

- Линейно–угловые измерения, включающие измерения линейных размеров, дуг, углов, а также площадей, объемов и т.д.;

- Электрические измерения, охватывающие измерения силы тока, напряжения, электрической мощности и энергии, фазовых сдвигов, измерения сопротивлений, емкостей и т.д.,

- Физико-химические измерения, включающие измерения влажности, измерения составов газов, физических характеристик веществ, концентрации веществ и т.д.,

- Виброакустические измерения, охватывающие измерения вибро смещений, виброскоростей, виброускорений, акустических давлений, акустической мощности как случайных сигналов, уровней вибраций и шумов, спектров вибраций и шумов и т.д.

Измерения, реализуемые при исследованиях, испытаниях, наладке и эксплуатации систем автоматизации, холодильных систем, пищевых машин и оборудования могут входить в одну или несколько указанных групп: теплофизическую, механическую, физико-химическую и др.

Для рассматриваемых предметных областей существуют вполне сложившиеся наборы измерительных задач с относительно устоявшимися средствами к технологиям измерений. В частности, холодильная техника характеризуется, в значительной степени, типовым набором измерительных задач, таких как, измерение показателей качества оборудования - холодопроизводительности холодильных машин или компрессоров, тепловых потоков и коэффициентов теплопередачи для теплообменников, измерение параметров для элементов оборудования - температур, давлений, расходов, влажностей и т.д. Вполне отработаны, учитывающие специфику рассматриваемой предметной области, общие методики измерений и технологии, касающиеся формирования конструкций измерительных (испытательных) теплотехнических стендов, выбора типов измерительных средств и определения требований к точности измерений.

**Современные измерительные задачи** реализуются с применением микроэлектроники и компьютерной техники, обеспечивающих получение

существенно эффективных измерений, и предполагающих: наличие распределенных объектов измерения (например, холодильных камер, холодильных маний, теплообменных аппаратов, испытательных стендов и т.д.), состояние которых определяется совокупностью параметров и для которых производятся многоканальные измерения, 2) применение системы сбора многоканальной измерительной информации и ЭВМ; 3) возможность управления от ЭВМ процессам измерения; 4) реализацию в ЭВМ математической обработки больших объемов измерительной информации.

Приведем общепринятую классификацию для измерительных средств.

**Измерительный преобразователь** — это техническое устройство, вырабатывающее измерительную информацию в виде, необходимом для последующего использования в автоматических системах, в системах передачи и обработки данных и т.д. На вход измерительного преобразователя поступает измеряемая физическая величину  $X$ , выходом является физическая величина, обозначаемая как  $Z$ , в которой содержится измерительная информация о величине  $X$ . Данное техническое устройство преобразует одну физическую величину  $X$  в другую физическую величину  $Z$ . Измерительный преобразователь представляет собой достаточно общее понятие.

**Измерительное средство** — это техническое устройство, предназначенное для реализации измерений и имеющее определенные метрологические характеристики. Входом для измерительного средства служит измеряемая физическая величина  $X$ , выходом — ее измеренное значение, обозначаемое, как  $Y$ .

**Мера** — это измерительное средство, предназначенное для воспроизведения (калибровки) измеряемой физической величины; например, к мерам относятся такие измерительные средства, как мерные массы, мерные линейки (меры длины) и г.д.

**Измерительный прибор** — это измерительное средство, предназначенное для выработки измерительной информации, доступной для непосредственного наблюдения. Измерительные приборы различаются типом выходной информации: 1) приборы с аналоговой (непрерывной) выходной информацией, в которых, чаще всего, для считывания показаний применяются стрелочные индикаторы; 2) приборы с цифровой выходной информацией, для которых показания, как правило, считываются в цифровой форме, например, со светодиодных индикаторов. Измерительные приборы бывают показывающими, регистрирующими или комбинированными.

**Датчики** — это измерительные преобразователи с выходной информацией в виде аналогового электрического сигнала. Датчики, как правило, входят в состав контрольно — измерительных приборов и систем автоматики. Иногда датчики включаются в единый конструктивный узел — измерительный регулятор, на который возлагаются задачи регулирования.

Датчики физических величин, которые выпускаются специализированными фирмами, как правило, подвергаются унификации по целому ряду параметров: по источникам питания; по форме и размерам монтажных плат, каркасов, панелей, пультов, конструкций корпусов,

оснований и присоединительных узлов, по видам исполнений – пыле- и влагозащитном, герметичном, виброустойчивом и т.д.

Рассмотрим унифицированные требования к выходным электрическим сигналам датчиков в части диапазонов изменения по току или напряжению. Предполагается, что для датчиков устанавливаются пределы изменения намеряемых физических величин  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ : обозначения  $\bar{y}_1, \bar{y}_2$  (мА или В) применяются для задания граничных значений диапазона изменения выходных сигналов. При этом, выходной сигнал датчика  $y$  связывается с измеряемой величиной  $x$  линейной зависимостью с насыщением

$$y = \bar{y}_1 + (x - \bar{x}_1) \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1} \text{ для } \bar{x}_1 < x < \bar{x}_2, \quad (1.3)$$

причем  $y = \bar{y}_1$  для  $x \leq \bar{x}_1$  и  $y = \bar{y}_2$  для  $x \geq \bar{x}_2$ . По величине выходного сигнала  $y$  для  $\bar{y}_1 < y < \bar{y}_2$  на основе (2.1.3) определяется измеряемая величина  $x$ .

**Микропроцессорные датчики** – это измерительные преобразователи с выходной информацией в виде цифрового кода. Микропроцессорные датчики состоят: 1) из аналоговой части, преобразующей измеряемую физическую величину в электрический сигнал, 2) из микропроцессорной части, состоящей из блока АЦП, микропроцессорного блока, блока памяти и блока управления. Микропроцессорная часть представляет собой, фактически, микроЭВМ, реализованную в виде микросхемы. Наличие микроЭВМ, даже с ограниченными арифметическими возможностями и памятью, позволяет реализовать функции интеллектуальных датчиков, осуществляющих предварительную обработку информации и управление процессом измерения.

Для обеспечения удобств сопряжения микропроцессорных датчиков с ЭВМ или локальной вычислительной сетью выходные цифровые коды от указанных датчиков нормируются соответствующим образом. Взаимная передача цифровой информации между системой микропроцессорных датчиков и ЭВМ через локальную сеть реализуется на основе протоколов обмена. Цифровые сигналы, посылаемые от ЭВМ к датчикам или наоборот, формируются на основе определенных протоколом правил, которые позволяют декодировать (кодировать) принятую (посланную) информацию.

**Датчики (сенсоры) на интегральных схемах** – это измерительные преобразователи, реализованные в виде специальных интегральных схем. Конструкции указанных датчиков обязательно содержат аналоговую часть; параметры электронных компонент аналоговой части оказываются зависящими от измеряемых физических величин, например, температуры, давления, влажности и т.д.

**Компьютерные измерительные системы** – представляют собой системы, состоящие из ЭВМ, набора измерительных средств, электронных схем ввода аналоговых измерительных сигналов в ЭВМ и вывода цифровых сигналов из ЭВМ для передачи управляющих сигналов в измерительные средства. Применение ЭВМ позволяет эффективно решать задачи управления измерительными средствами, задачи обработки результатов измерений, задачи отображения измерительной информации на мониторе,

задачи выбора информации, полученной от нескольких измерительных средств.

### **Метрологические характеристики приборов**

Метрологические характеристики приборов позволяют производить их точностные сравнения, оценивать их технические свойства и возможности. Все эксплуатационные свойства измерительных приборов определяются их метрологическими характеристиками, которые приводятся в паспортной документации к приборам. Указанные характеристики обеспечивают необходимое для инженерной практики единство и установление методов контроля. Приведем некоторые определения и обозначения.

**Начальное и конечное значение шкалы отсчетного устройства** – наименьшее и наибольшее значение измеренной величины  $Y$ , которые указываются на шкале отсчетного устройства или воспроизводятся цифровым отсчетным устройством измерительного средства:  $Y_{\min}$ ,  $Y_{\max}$ , причем  $Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max}$ .

**Диапазон показаний** – интервал, ограниченный начальным и конечным значением отсчетного устройства измерительного средства:  $\Delta Y = Y_{\max} - Y_{\min}$ .

**Пределы (верхний и нижний) измерений** – наибольшее и наименьшее значение границ диапазона изменения измеряемой величины  $X$ , которые могут быть реализованы измерительным средством:  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ , причем  $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$ .

**Диапазон измерений (преобразований)** – область значений измеряемой величины  $x$ , для которой определены метрологические характеристики используемого измерительного средства:  $\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$ .

**Абсолютная погрешность** измерения  $\Delta y$  определяется как разность  $\Delta y = y - x$ .

**Граничная погрешность** измерений  $\Delta \bar{y}$  – максимальное значение для модуля абсолютной погрешности  $\Delta y$ :  $|\Delta y| \leq \Delta \bar{y}$ . Граничная погрешность ставится в соответствие каждому значению измеряемой величины  $x$ . Иногда, употребляется термин «граничная погрешность для некоторого измерительного средства»: в этом случае подразумевается, что  $\Delta \bar{y}$  является одинаковой для всего диапазона измерения  $X_{\min} \leq x \leq X_{\max}$ , или  $\Delta \bar{y}$  представляет собой максимальное значение для граничной погрешности в том же диапазоне.

**Относительная погрешность** измерения  $\delta y$  определяется как отношение (для  $x \neq 0$ )

$$\delta y = \frac{\Delta y}{x}, \quad (\delta y = \frac{\Delta y}{x} \cdot 100 \%).$$

**Граничная относительная погрешность**  $\delta \bar{y}$  – определяется следующим образом:

$$\delta \bar{y} = \frac{\Delta \bar{y}}{x}, \quad (\delta \bar{y} = \frac{\Delta \bar{y}}{x} \cdot 100 \%).$$

**Приведенная погрешность** – отношение абсолютной погрешности к диапазону измерений

$$\delta_{n,y} = \frac{\Delta y}{\Delta X}, (\delta_{n,y} = \frac{\Delta y}{\Delta Y}).$$

**Граничная приведенная погрешность** определяется отношениями

$$\delta_{n,\bar{y}} = \frac{\Delta \bar{y}}{\Delta X}, (\delta_{n,\bar{y}} = \frac{\Delta \bar{y}}{\Delta Y}).$$

**Основная погрешность** – погрешность измерительного средства при значениях действующих факторов, принятых за нормальные.

**Дополнительная погрешность** – изменение погрешности по отношению к величине основной погрешности, вызванное отклонением действующих факторов от значений, принятых за нормальные.

**Класс точности** – паспортная характеристика точности измерительного средства, зависящая от значений граничной погрешности  $\Delta \bar{y}$ , принятой одинаковой или максимальной для всего диапазона измерений и диапазона 'показаний'  $\Delta Y$ . При определении класса точности воспользуемся стандартный рядом чисел  $\delta_{rn} = a_r \cdot 10^n$ ,  $r = 1, 2, \dots, 7$ ,  $n = 1, 0, -1, -2, \dots$ ,  $a_1 = 1.0$ ,  $a_2 = 1.5$ ,  $a_3 = 2.0$ ,  $a_4 = 2.5$ ,  $a_5 = 4.0$ ,  $a_6 = 5.0$ ,  $a_7 = 7.0$ . Сформируем значения граничной относительной погрешности  $\delta_{p,\bar{y}}$  и разности  $\Delta \delta_{rp}$

$$\delta_{n,\bar{y}} = \frac{\Delta \bar{y}}{\Delta Y}, \Delta \delta_{rn} = \delta_{rn} - \delta_{n,\bar{y}}.$$

Пусть ко множеству  $RN$  принадлежат индексы  $r$  и  $n$ , для которых выполняется неравенство  $\Delta \delta_{rn} = \delta_{rn} - \delta_{n,\bar{y}} \geq 0$ . Подберем индексы  $r^*$  и  $n^*$  из множества  $RN$ , обеспечивающие минимум положительной разности

$$(r^*, n^*) = \arg \left\{ \min \Delta \delta_{rn} \right\}, \\ r, n \in RN$$

Так, например, если для некоторого прибора величина  $\delta_{n,\bar{y}}$  оказывается равной 0,0048, то подбирается  $r^* = 5$ ,  $n^* = -3$  и  $\delta_{r^*n^*} = 0.005$ ; и это означает, что класс точности  $C$  рассматриваемого измерительного средства принимает значение  $C = 0.005 \cdot 100 = 0.5$ .

**Чувствительность измерительного средства**  $S_*$  представляет отношение изменения выходной измеренной величины к изменению входной измеряемой величины

$$S_* = \frac{\Delta y}{\Delta x}.$$

**Цена деления шкалы** определяется разностью значений величин, соответствующих двум соседним отсчетам шкалы измерительного средства. Цена деления связана с чувствительностью – она равняется числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление прибора

$$D_* = \frac{1}{S_*} = \frac{\Delta x}{\Delta y}.$$

**Продолжительность установления показаний** измерительного средства, или время реакции, измеряется от момента начала измерений до момента представления результата измерения на отсчете устройстве с нормируемой погрешностью.

**Стабильность измерительного средства** – качество, отражающее неизменность во времени его метрологических свойств. Изменение

метрологических свойств во времени вызывает дополнительные погрешности.