

### Тема 3: Виды, методы и средства измерений

#### 3.1 Классификация видов и методов измерений

В зависимости от рода измеряемой величины, условий проведения измерений и приемов обработки экспериментальных данных измерения могут классифицироваться с различных точек зрения.

По характеру зависимости измеряемой величины *от времени* измерения разделяются на

- *статические*, при которых измеряемая величина остается постоянной во времени (измерение постоянного давления, электрических величин в цепях с установившимся режимом);
- *динамические*, в процессе которых измеряемая величина изменяется и является непостоянной во времени (измерение пульсирующих давлений, вибраций, электрических величин в условиях протекания переходного процесса).

С точки зрения *общих приемов* (способов) получения результатов они разделены на четыре класса:

- прямые;
- косвенные;
- совокупные;
- совместные.

**Прямое измерение** – измерения, при котором искомое значение получают непосредственно. Например, измерение длины детали линейкой. Прямые измерения можно выразить формулой  $Q = X$ , где  $Q$  - искомое значение измеряемой величины, а  $X$  - значение, непосредственно получаемое из опытных данных.

При прямых измерениях экспериментальным операциям подвергают измеряемую величину, которую сравнивают с мерой непосредственно или же с помощью измерительных приборов, градуированных в требуемых единицах.

**Косвенное измерение** – определение искомого значения величины на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной. Например, определение объема цилиндра по результатам измерений его диаметра и высоты:  $V_{кр.цил.} = \pi R^2 h$ . Значение измеряемой величины находят путем вычисления по формуле:

$$Q = F(x_1, x_2, \dots, x_N),$$

где  $Q$  - искомое значение косвенно измеряемой величины;  $F$  - функциональная зависимость, которая заранее известна,  $x_1, x_2, \dots, x_N$  - значения величин, измеренных прямым способом.

Косвенные измерения широко распространены в тех случаях, когда искомую величину невозможно или слишком сложно измерить непосредственно или когда прямое измерение дает менее точный результат. Роль их особенно велика при измерении величин, недоступных непосредственному экспериментальному сравнению, например размеров астрономического или внутриатомного порядка.

**Совокупные измерения** – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при котором искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях. При этом для определения значений искомых величин число уравнений должно быть не меньше числа величин. Примером совокупных измерений являются измерения, когда значение массы отдельных гирь из набора определяют по известному значению массы одной из гирь и по результатам измерений масс различных сочетаний гирь.

**Пример.** Необходимо произвести калибровку разновеса, состоящего из гирь массой 1, 2, 2\*, 5, 10 и 20 кг (звездочкой отмечена гиря, имеющая то же самое номинальное значение, но другое истинное). Калибровка состоит в определении массы каждой гири по одной образцовой гире, например по гире массой 1 кг. Для этого проведем измерения, меняя каждый раз комбинацию гирь (цифры показывают массу отдельных гирь,  $1_{\text{обр}}$  - обозначает массу образцовой гири в 1 кг):

$$1 = 1_{\text{обр}} + a$$

$$1 + 1_{\text{обр}} = 2 + b$$

$$2^* = 2 + c$$

$$1 + 2 + 2^* = 5 + d \text{ и т.д.}$$

Буквы  $a, b, c, d$  означают грузики, которые приходится прибавлять или отнимать от массы гири, указанной в правой части уравнения, для уравнивания весов. Решив эту систему уравнений, можно определить значение массы каждой гири.

**Совместные измерения** – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними.

Пример совместных измерений: измерение, при котором электрическое сопротивление резистора при температуре 20°C и его температурные коэффициенты находят по данным прямых измерений сопротивления, выполненных при разных температурах.

По условиям, определяющим **точность результата**, измерения делятся на три класса:

1. *Измерения максимальной возможной точности*, достижимой при существующем уровне техники.

К ним относятся в первую очередь эталонные измерения, связанные с максимально возможной точностью воспроизведения установленных единиц физических величин, и, кроме того, измерения физических констант, прежде всего универсальных (например, абсолютного значения ускорения свободного падения, гиромагнитного отношения протона и др.).

К этому же классу относятся и некоторые специальные измерения, требующие высокой точности.

2. *Контрольно-поверочные измерения*, погрешность которых с определенной вероятностью не должна превышать некоторого заданного значения.

К ним относятся измерения, выполняемые лабораториями государственного надзора за внедрением и соблюдением стандартов и состоянием измерительной техники и заводскими

измерительными лабораториями, которые гарантируют погрешность результата с определенной вероятностью, не превышающей некоторого, заранее заданного значения.

3. *Технические измерения*, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений.

Примерами технических измерений являются измерения, выполняемые в процессе производства на машиностроительных предприятиях, на щитах распределительных устройств электрических станций и др.

По *способу выражения результатов* измерений различают абсолютные и относительные измерения.

**Абсолютное измерение** – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Например, измерение силы  $F = mg$  основано на измерении основной величины – массы  $m$  и использовании физической постоянной  $g$ .

**Относительное измерение** – измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

В качестве примера относительных измерений можно привести измерение относительной влажности воздуха, определяемой как отношение количества водяных паров в  $1 \text{ м}^3$  воздуха к количеству водяных паров, которое насыщает  $1 \text{ м}^3$  воздуха при данной температуре:  $r = p/p_n$ , где  $p$  – давление водяных паров в воздухе;  $p_n$  – давление водяных паров, насыщающих пространство при данной температуре.

По *числу измерений* одной и той же величины измерения делятся на однократные и многократные. От числа измерений зависит методика обработки экспериментальных данных. При многократных наблюдениях для получения результата измерений приходится прибегать к статистической обработке результатов наблюдений.

Основными характеристиками измерений являются: принцип измерений, метод измерений, погрешность, точность, правильность и достоверность.

**Принцип измерений** – физическое явление или эффект, положенное в основу измерения. Например, использование силы тяжести при измерении массы взвешиванием, измерение температуры с использованием термоэлектрического эффекта.

**Метод измерений** – совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

**Метод непосредственной оценки** – метод, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений. Например, взвешивание на циферблатных весах или измерение давления пружинным манометром.

**Дифференциальный метод** – метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами. Этот метод может дать очень точные результаты. Так, если разность составляет 0,1 % измеряемой величины и оценивается прибором с точностью до 1 %, то точность измерения искомой величины составит уже 0,001 %. Например, при сравнении одинаковых линейных мер, где разность между ними определяется окулярным микрометром, позволяющим ее оценить до десятых долей микрона.

**Нулевой метод измерений** – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля. Мера

– средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения физической величины. Например, измерение массы на равноплечих весах при помощи гирь. Принадлежит к числу очень точных методов.

**Метод сравнения с мерой** – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Например, измерение напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с известной ЭДС нормального элемента. Результат измерения при этом методе либо вычисляют как сумму значения используемой для сравнения меры и показания измерительного прибора, либо принимают равным значению меры. Существуют различные модификации этого метода:

- метод измерения **замещением** (измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины, например, при взвешивании поочередным помещением массы и гирь на одну и ту же чашку весов),
- метод измерений **дополнением**, в котором значение измеряемой меры дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению.

Непосредственной задачей измерения является определение значений измеряемой величины. В результате измерения физической величины с истинным значением  $X_{\text{и}}$  мы получаем оценку этой величины  $X_{\text{изм.}}$  – результат измерений. При этом следует четко различать два понятия: **истинные значения** физических величин и их эмпирические проявления – **действительные значения**, которые являются результатами измерений и в конкретной измерительной задаче могут приниматься в качестве истинных значений. Истинное значение величины неизвестно и оно применяют только в теоретических исследованиях. Результаты измерений являются продуктами нашего познания и представляют собой приближенные оценки значений величин, которые находятся в процессе измерений. Степень приближения полученных оценок к истинным (действительным) значениям измеряемых величин зависит от многих факторов: метода измерений, использованных средств измерений и их погрешностей, от свойств органов чувств операторов, проводящих измерения, от условий, в которых проводятся измерения и т.д. Поэтому между истинным значением физической величины и результатом измерений всегда имеется различие, которое выражается **погрешностью измерений** (то же самое, что погрешностью результата измерений).

**Погрешность результата измерения** — отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины:

$$\Delta X = X_{\text{изм.}} - X_{\text{ист.}}$$

Так как истинное значение измеряемой величины всегда неизвестно и на практике мы имеем дело с действительными значениями величин  $X_{\text{д}}$ , то формула для определения погрешности в связи с этим приобретает вид:

$$\Delta X = X_{\text{изм.}} - X_{\text{д}}$$

**Точность измерений** - это характеристика измерений, отражающая близость их результатов к истинному значению измеряемой величины.

Количественно точность можно выразить величиной, обратной модулю относительной погрешности:

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta X}{X_{\text{д}}} \right|^{-1}.$$

Например, если погрешность измерений равна  $10^{-2}\% = 10^{-4}$ , то точность равна  $10^4$ .

**Правильность измерения** определяется как качество измерения, отражающее близость к нулю систематических погрешностей результатов (т.е. таких погрешностей, которые остаются постоянными или закономерно изменяются при повторных измерениях одной и той же величины).

Важнейшей характеристикой качества измерений является их *достоверность*; она характеризует доверие к результатам измерений и делит их на две категории: достоверные и недостоверные, в зависимости от того, известны или неизвестны вероятностные характеристики их отклонений от действительных значений соответствующих величин. Результаты измерений, достоверность которых неизвестна, не представляют ценности и в ряде случаев могут служить источником дезинформации.

Наличие погрешности ограничивает достоверность измерений, т.е. вносит ограничение в число достоверных значащих цифр числового значения измеряемой величины и определяет точность измерений.

### 3.2 Классификация и параметры средств измерительной техники

**Средство измерений (СИ)** – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее или хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменной в течение известного интервала времени.

К средствам измерений относятся меры, измерительные: преобразователи, приборы, установки и системы.

**Мера физической величины** – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Примеры мер: гири, измерительные резисторы, концевые меры длины, измерительные колбы и др.

Меры, воспроизводящие физические величины лишь одного размера, называются **однозначными** (гиря), нескольких размеров – **многозначные** (миллиметровая линейка – позволяет выражать длину как в мм, так и в см). Кроме того, существуют наборы и магазины мер, например, магазин емкостей или индуктивностей.

При измерениях с использованием мер сравнивают измеряемые величины с известными величинами, воспроизводимыми мерами. Сравнение осуществляется разными путями, наиболее распространенным средством сравнения является *компаратор*, предназначенный для сличения мер однородных величин. Примером компаратора являются рычажные весы.

К мерам относятся **стандартные образцы и образцовое вещество**, которые представляют собой специально оформленные тела или пробы вещества определенного и строго регламентированного содержания, одно из свойств которых является величиной с известным значением. Например, образцы твердости, шероховатости.

**Измерительный преобразователь (ИП)** – техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, индикации или передачи. Измерительная информация на выходе ИП, как правило, недоступна для непосредственного восприятия наблюдателем. Хотя ИП являются конструктивно обособленными элементами, они чаще всего входят в качестве составных частей в более сложные измерительные приборы или установки и самостоятельного значения при проведении измерений не имеют.

Преобразуемая величина, поступающая на измерительный преобразователь, называется *входной*, а результат преобразования – *выходной* величиной. Соотношение между ними задается *функцией преобразования*, которая является его основной метрологической характеристикой.

Для непосредственного воспроизведения измеряемой величины служат *первичные преобразователи*, на которые непосредственно воздействует измеряемая величина и в которых происходит трансформация измеряемой величины для ее дальнейшего преобразования или индикации. Примером первичного преобразователя является термопара в цепи термоэлектрического термометра. Одним из видов первичного преобразователя является **датчик** – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он «дает» информацию). Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от средства измерений, принимающего его сигналы. Например, датчик метеорологического зонда. В области измерений ионизирующих излучений датчиком часто называют детектор.

По характеру преобразования ИП могут быть *аналоговыми, аналого-цифровыми (АЦП), цифро-аналоговыми (ЦАП)*, то есть, преобразующими цифровой сигнал в аналоговый или наоборот. При аналоговой форме представления сигнал может принимать непрерывное множество значений, то есть, он является непрерывной функцией измеряемой величины. В цифровой (дискретной) форме он представляется в виде цифровых групп или чисел. Примерами ИП являются измерительный трансформатор тока, термометры сопротивления.

**Измерительный прибор** – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне. Измерительный прибор представляет измерительную информацию в форме, доступной для *непосредственного восприятия* наблюдателем.

По *способу индикации* различают *показывающие и регистрирующие приборы*. Регистрация может осуществляться в виде непрерывной записи измеряемой величины или путем печатания показаний прибора в цифровой форме.

Измерительные приборы состоят из чувствительного элемента, который находится под непосредственным воздействием физической величины, измерительного механизма и отсчетного устройства.

Отсчетное устройство может быть регистрирующим, цифровым и имеющим шкалу и указатель (в виде стержня-стрелки или лучика света – светового указателя).

Регистрирующие отсчетные устройства оснащают пишущим или печатающим механизмом и лентой. Информацию записывает световой или электронный луч, перемещение которого зависит от значений измеряемой величины, которая изменяется во времени (осциллограф, барограф, термограф).

По *принципу действия* различают приборы прямого действия и приборы сравнения.

Приборы *прямого действия* отображают измеряемую величину на показывающем устройстве, имеющем градуировку в единицах этой величины. Например, амперметры, термометры, манометры, термометры.

**Приборы сравнения** предназначены для сравнения измеряемых величин с величинами, значения которых известны. Характерной особенностью является то, что погрешность измерения прибора обусловлена погрешностью меры, т.е. известной величины, с которой сравнивают полученные значения. Такие приборы используются для измерений с большей точностью.

По *действию* измерительные приборы разделяют на *интегрирующие и суммирующие, аналоговые и цифровые, самопишущие и печатающие*.

*Аналоговыми* приборами являются, как правило, стрелочные приборы с отсчетным устройством.

**Цифровые приборы** автоматически вырабатывают дискретные сигналы измерительной информации и подают их в цифровой форме. Они имеют некоторые преимущества:

автоматизация процесса измерения; исключение субъективной погрешности; экономия времени; удобство фиксирования и печатания показаний; корректировка погрешностей за счет использования разных программ.

По принципу действия, положенному в основу измерительной системы, приборы разделяют на механические, оптические, оптико-механические, пневматические, электрические и т.д.

**В зависимости от назначения** приборы разделяют на универсальные, предназначенные для измерения одинаковых физических величин разных объектов, и специальные, предназначенные для измерения параметров однотипных изделий (например, размеров зубчатых колес) или одного параметра разных изделий (например, неровностей, твердости).

Во многих случаях название прибора определяется конструкцией измерительного механизма. Универсальные приборы для линейных измерений с механической измерительной системой делят на: штангенприборы с нониусом, микрометрические приборы с микрометрическим винтом, рычажно-механические приборы с зубчатыми, рычажно-зубчатыми и пружинными механизмами.

**В зависимости от вида измеряемых величин** различают приборы для измерения геометрических размеров, механических параметров, расхода, вместимости, уровня, давления и вакуума, физико-химических, температурных и теплофизических, электрических и магнитных, радиоэлектронных, виброакустических, оптических величин, времени и частоты, параметров ионизирующих излучений, биомедицинские.

**По связи с объектом измерения** различают **контактные** и **бесконтактные** приборы.

**Измерительная установка и система** – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов и других устройств, предназначенных для измерений одной или нескольких величин и расположенная в одном месте (*установка*) или в разных местах объекта измерений (*система*). Измерительные системы, как правило, являются *автоматизированными* и по существу они обеспечивают автоматизацию процессов измерения, обработки и представления результатов измерений. Примером измерительных систем являются автоматизированные системы радиационного контроля (АСРК) на различных ядерно-физических установках, таких, например, как ядерные реакторы или ускорители заряженных частиц.

**По метрологическому назначению** средства измерений делятся на рабочие и эталоны.

**Рабочее СИ** – средство измерений, предназначенное для измерений, не связанное с передачей размера единицы другим средствам измерений. Рабочее средство измерений может использоваться и в качестве индикатора. **Индикатор** – техническое средство или вещество, предназначенное для установления наличия какой-либо физической величины или превышения уровня ее порогового значения. Индикатор не имеет нормированных метрологических характеристик. Примерами индикаторов являются осциллограф, лакмусовая бумага и т.д.

**Эталон** – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера другим средствам измерений. Среди них можно выделить **рабочие эталоны** разных разрядов, которые ранее назывались **образцовыми средствами измерений**.

**Стандартизованное СИ** – средство измерений, изготовленное и применяемое в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта. Стандартизованные средства измерений обычно подвергают испытаниям и вносят в Государственный реестр.

**Нестандартизованное СИ** – средства измерений, стандартизация требований к которому признана нецелесообразной. К нестандартизованным обычно относятся узко специализированные средства измерений, изготовленные в единичных экземплярах и не предназначенные для массового производства. Измерительные задачи, решаемые с помощью таких средств измерений, носят ограниченный и локальный характер. Как правило, такие

средства измерений используются на одном или нескольких предприятиях для вспомогательных измерений. Часто они применяются в качестве **индикаторов**. К понятию стандартизованного средства измерений примыкает понятие узаконенного средства измерений.

**Узаконенное СИ** – средство измерений, признанное годным и допущенное для применения уполномоченным на то органом. Примеры узаконенных средств измерений: государственные эталоны становятся таковыми в результате утверждения национальным органом по стандартизации, рабочие средства измерений, предназначенные для серийного выпуска, которые узакониваются путем **утверждения типа**.

### 3. 3 Основные этапы измерения

Процесс измерений можно разделить на три основные этапы:

- подготовка и планирование;
- выполнение;
- обработка и анализ полученных данных.

На этапе подготовки и планирования измерений необходимо определить:

- модель исследуемого объекта;
- измеряемые параметры модели;
- цель измерения, которая обуславливает необходимую точность измерений и в значительной степени влияет на выбор модели измеряемой величины;
- зависимость между величинами, значения которых необходимо определить по непосредственно измеряемым величинам (при непрямых измерениях);
- условия измерений (температура среды, напряжение в электрической сети и т. д.)
- допустимые погрешности измерений каждой из непосредственно измеряемых величин.

На этапе выполнения измерений необходимо выбрать:

- методики измерений отдельных величин;
- СИТ, их метрологические характеристики (погрешность, поверка, точность);
- способы коррекции погрешностей измерений (повторные измерения, применение другого прибора).

На этапе обработки и анализа полученных данных необходимо определить:

- форму подачи результатов измерений (цифры, графики);
- необходимые алгоритмы и средства обработки экспериментальных данных и определения их достоверности (автоматизированные комплексы, подключение компьютера);
- необходимые затраты на выполнение задания;
- экономическую эффективность измерений.