

Лекция 2 Классификация измерений. Измерение физических величин. Виды и методы измерений

2.1 Измерение

Измерение физических величин заключается в сопоставлении какой-либо величины с однородной величиной, принятой за единицу.

В метрологии используется термин "**измерение**", под которым понимается совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Следует отметить, что термин "измерение" в таком понятии значительно сокращает область его применения, так как широко применяются измерения (органолептические), основанные на использовании органов чувств человека (например, оценка спортивных выступлений в фигурном катании, гимнастике). Другими словами, термин "измерение" не ограничен нахождением значения физической величины, так как часто измеряют и нефизические величины. Производным от термина «измерение» является термин «измерять», широко используемый на практике. Встречаются термины «мерить», «обмерять», «замерять», но применение их в метрологии недопустимо.

Цель измерения заключается в получении количественной информации об измеряемом объекте с гарантированной достоверностью. Как мы увидим в дальнейшем, выбор метода и средства измерений, а также методики выполнения эксперимента нацелен на достижение оптимального результата, причем критерием оптимальности служит, как правило, предельно достижимая точность измерений при минимуме затрат на технические средства и процедуру.

Следует заметить, что уровень точности, к которому надо стремиться должен определяться критерием целесообразности. Известно, что увеличение точности в два раза удорожает измерение в несколько раз. В тоже время уменьшение точности измерений ниже нормы приводит к браку продукции. Важно иметь в виду и значимость результата измерений. В одних случаях результат измерений имеет небольшое или локальное значение, в других он играет исключительно важную роль: от точности результата измерений может зависеть научное открытие или жизнь людей (например, при измерении концентрации метана в шахтах). Именно значимость результата измерений определяет ту совокупность требований, которые должны предъявляться к качеству измерений, под которым подразумевается совокупность их свойств обуславливающих соответствие средств, метода, методики, условий измерений и состояния единства измерений требованиям измерительной задачи (техники безопасности, экологического, экономического и других факторов).

Измерение можно представить в виде функциональной схемы, изображенной на рисунке 1.



Рисунок 1 - Основные элементы, участвующие в измерениях

Объект измерения — это тело (физическая система, процесс, явление и т. д.), которое характеризуется одной или несколькими измеряемыми физическими величинами. Очевидно, что любой объект измерения нуждается в описании его свойств.

2.2 Виды измерений

Измерения, выполняемые с помощью специальных технических средств, называют **инструментальными**. Простейшим примером таких измерений является определение размера детали линейкой с делениями, т. е. сравнение размера детали с единицей длины, хранимой линейкой.

Для упорядочения измерительной деятельности измерения классифицируют по следующим признакам:

- общим приемам получения результатов измерений — **прямые, косвенные, совместные и совокупные**;
- числу измерений в серии — **однократные** и **многократные**;
- метрологическому назначению — **технические** и **метрологические**;
- характеристике точности — **равноточные** и **неравноточные**;
- отношению к изменению измеряемой величины — **статические** и **динамические**;
- выражению результата измерений — **абсолютные** и **относительные**.

Прямые измерения — измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных (измерения массы на весах, температуры термометром, длины с помощью линейных мер). 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. Примерами прямых служат измерения длины тела линейкой, массы при помощи весов и др. Прямые измерения широко применяются в машиностроении, а также при контроле технологических процессов (измерение давления, температуры и др.).

Косвенные измерения — измерения, при которых искомое значение находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными прямыми измерениями (*определение плотности однородного тела по его массе и геометрическим размерам, удельного электрического сопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения*).

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.

Примеры косвенных измерений: определение объема тела по прямым измерениям его геометрических размеров, нахождение удельного электрического сопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения.

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 — измерения нескольких однородных величин, при которых искомое значение величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин (*измерения, при которых масса отдельных гирь набора находится по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь*).

Примером совокупных измерений является определение массы отдельных гирь набора (калибровка по известной массе одной из них и по результатам прямых сравнений масс различных сочетаний гирь).

Совместные измерения — одновременные измерения двух или нескольких неоднородных величин для нахождения зависимости между ними (*проводимые одновременно измерения приращения длины образца в зависимости от изменений его температуры и определение коэффициента линейного расширения*).

В качестве примера можно назвать измерение электрического сопротивления при 20°C и температурных коэффициентов измерительного резистора по данным прямых измерений его сопротивления при различных температурах.

Абсолютные измерения — измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и использовании физических констант.

Относительные измерения — получение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Однократное измерение — измерение, выполняемое один раз (измерение конкретного времени по часам).

Многократные измерения — измерения одной и той же физической величины, результат которых получают из нескольких следующих друг за другом измерений. Обычно многократными измерениями считаются те, которые производятся свыше трех раз.

Технические измерения — измерения, выполняемые при помощи рабочих средств измерений с целью контроля и управления научными экспериментами, контроля параметров изделий и т. д. (измерение давления воздуха в автомобильной камере).

Метрологические измерения — измерения при помощи эталонов и образцовых средств измерений с целью нововведения единиц физических величин или передачи их размеров рабочим средствам измерений.

Равноточные измерения — ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях.

Неравноточные измерения — ряд измерений какой-либо величины, выполненных различными по точности средствами измерений и в разных условиях.

Статические измерения — измерения физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения (измерения размера детали при нормальной температуре).

Динамические измерения — измерения физической величины, размер которой изменяется с течением времени (*измерения расстояния до уровня земли со снижающегося самолета*).

2.3 Виды средств измерений

Средства измерений – технические средства, применяемые для проведения экспериментальной части измерений и имеющие нормированные метрологические свойства. Средства измерений являются носителями единиц, в которых хотят выразить измеряемые величины. В связи с большим количеством видов измеряемых величин принципы действия средства измерений весьма разнообразны. Существуют средства измерений, в основе действия которых лежат механические, электрические, электронные, магнитные, оптические, термические, химические и другие явления, а также их сочетания. Кроме чисто измерительных целей, средства измерений широко используются также в устройствах контроля, сигнализации, регулирования, управления производственными процессами, а также для сбора всякого рода информации, подлежащей в дальнейшем обработке с помощью вычислительных машин.

Для практического измерения единицы величины применяются технические средства, которые имеют нормированные погрешности и называются средствами измерений. К средствам измерений относятся: **меры, измерительные приборы, измерительные установки и системы, измерительные преобразователи и измерительные принадлежности.**

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера (*гиря — мера массы, генератор — мера частоты электрических колебаний*).

Меры, в свою очередь, подразделяют на **однозначные** и **многозначные** меры.

Однозначная мера — мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (*плоскопараллельная концевая мера длины, нормальный элемент, конденсатор постоянной емкости*).

Многозначная мера — мера, воспроизводящая ряд одноименных физических величин различного размера (*линейка с миллиметровыми делениями, конденсатор переменной емкости*).

Набор мер — специально подобранный комплект мер, применяемых не только по отдельности, но и в различных сочетаниях с целью воспроизведения ряда одноименных величин различного размера (*набор гирь, набор плоскопараллельных концевых мер длины*).

Измерительные приборы - это средства измерений, которые позволяют получать измерительную информацию в форме, удобной для восприятия пользователем. Различаются измерительные прибо-

ры прямого действия и приборы сравнения. В зависимости от метода регистрации и формы представления результата измерения измерительные приборы делятся на **аналоговые** (шкальными) и **цифровые**.

Аналоговые приборы состоят из **шкалы**, представляющей собой совокупность отметок и чисел, изображающих ряд последовательных значений измеряемой величины, и **указателя** (стрелки, электронного луча и других), связанных с подвижной системой прибора.

Отметки шкалы с представленными числовыми значениями называют числовыми отметками шкалы. **Основные характеристики шкалы** — **длина деления** шкалы, выражающаяся расстоянием между осями двух соседних штрихов шкалы, и **цена деления** шкалы, представляющая значение измеряемой величины, вызывающей перемещение указателя на одно деление.

Диапазон измерений представляет собой часть диапазона показаний, для которого нормированы пределы допускаемых погрешностей средств измерений. Наименьшее и наибольшее значения диапазона измерений называют соответственно **нижним** и **верхним пределами измерений**.

Значение величины, определяемое по отсчетному устройству средства измерений и выраженное в принятых единицах этой величины, называют **показанием средства измерений**.

Приборы прямого действия отображают измеряемую величину на показывающем устройстве, имеющем соответствующую градуировку в единицах этой величины. Изменения рода физической величины при этом не происходит. *К приборам прямого действия относят, например, амперметры, вольтметры, термометры и т.п.*

Приборы сравнения предназначаются для сравнения измеряемых величин с величинами, значения которых известны. Такие приборы широко используются в научных целях, а также и на практике для измерения таких величин, как яркость источников излучения, давление воздуха и др.

Измерительные установки и системы - это совокупность средств измерений, объединенных по функциональному признаку со вспомогательными устройствами, для измерения одной или нескольких физических величин объекта измерений. Обычно такие системы автоматизированы и обеспечивают ввод информации в систему, автоматизацию самого процесса измерения, обработку и отображение результатов измерений для восприятия их пользователем.

Измерительный преобразователь – это средство измерений, которое служит для преобразования сигнала измерительной информации в форму, удобную для обработки или хранения, а также передачи в показывающее устройство. Измерительные преобразователи либо входят в конструктивную схему измерительного прибора, либо применяются совместно с ним, но сигнал преобразователя не поддается непосредственному восприятию наблюдателем. Например, преобразователь может быть необходим для передачи информации в память компьютера, для усиления напряжения и т.д. *Преобразователи подразделяются на **первичные** (непосредственно воспринимающие измеряемую величину), **передающие**, на выходе которых величина приобретает форму, удобную для регистрации или передачи на расстояние; **промежуточные**, работающие в сочетании с первичными и не влияющие на изменение рода физической величины.*

Измерительные принадлежности - это вспомогательные средства измерений величин. Они необходимы для вычисления поправок к результатам измерений, если требуется высокая степень точности. *Например, термометр может быть вспомогательным средством, если показания прибора достоверны при строго регламентированной температуре; психрометр - если строго оговаривается влажность окружающей среды. Следует учитывать, что измерительные принадлежности вносят определенные погрешности в результат измерений, связанные с погрешностью самого вспомогательного средства.*

По метрологическому назначению средства измерений делят на два вида - **рабочие средства измерений** и **эталонные**. Рабочие средства измерений применяют для определения параметров (характеристик) технических устройств, технологических процессов, окружающей среды и др. Рабочие средства могут быть лабораторными (для научных исследований), производственными или учебными (для обеспечения и контроля заданных характеристик технологических процессов), полевыми (для самолетов, автомобилей, судов и т.п.). Каждый из этих видов рабочих средств отличается особыми показателями. Так, лабораторные средства измерений - самые точные и чувствительные, а их показания характеризуются высокой стабильностью. Производственные (учебные) обладают устойчивостью к воздействиям различных факторов производственного процесса: температуры, влажности, вибрации и т.п., что может сказаться на достоверности и точности показаний приборов. Полевые работают в условиях, постоянно изменяющихся в широких пределах внешних воздействий.

2.4 Методы и методики измерений

Выбор метода зависит от вида измеряемой величины, ее размера, точности результата измерений, быстроты его получения, условий, при которых проводятся измерения, и ряда других признаков (длину можно измерить линейкой, микрометром и т. д.).

Под термином **метод измерений** подразумевается способ решения измерительной задачи, характеризующийся его теоретическим обоснованием и разработкой основных приемов применения средств измерений. Существует более простое определение понятия метода измерений. **Метод измерений - совокупность приемов использования принципов и средств измерений.**

Принцип измерений — это совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Например, температуру можно измерять платиновым термометром (принцип измерения — зависимость сопротивления платины от температуры) и термоэлектрическим термометром (принцип измерения — зависимость ТЭДС от разности температур).

Каждую физическую величину можно измерить несколькими методами, которые имеют особенности как технического, так и методического характера. С методической стороны методы измерений поддаются систематизации и обобщению по характерным признакам.

Основными методами являются:

Метод непосредственной оценки, в котором значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетным устройствам измерительного прибора прямого действия (отсчет по часам, барометру-анероиду, термометру).

Метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (измерения массы на рычажных весах с уравниванием гирями; измерение напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с ЭДС параллельного элемента).

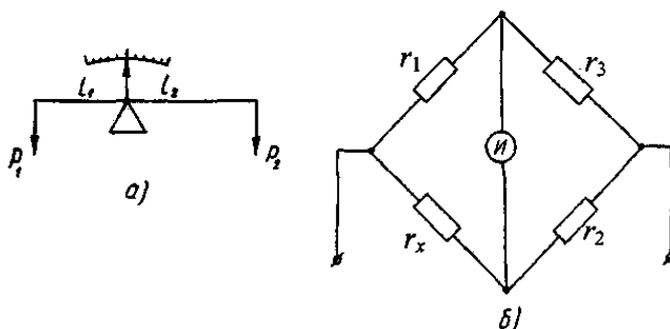
Метод замещения — разновидность метода сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой (взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы груза и гирь на одну и ту же чашу весов).

Контактный и бесконтактный методы — методы, при которых чувствительный элемент прибора приводится или не приводится в контакт с объектом измерений (измерения диаметра вала измерительной скобой осуществляется контактным методом; температуры в доменной печи — бесконтактным методом).

Дифференциальный метод характеризуется измерением разности между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. Метод позволяет получить результат высокой точности при использовании относительно грубых средств измерения.

Нулевой метод аналогичен дифференциальному, но разность между измеряемой величиной и мерой сводится к нулю. Другими словами **нулевой метод** — это метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сводят к нулю (взвешивание на равноплечих весах — безмене, шкальных весах).

При этом нулевой метод имеет то преимущество, что мера может быть во много раз меньше измеряемой величины. Рассмотрим, например, неравноплечие весы (рис. 2.2, а), где $P_1 l_1 = P_2 l_2$. В электротехнике — это мосты для измерения индуктивности, емкости, сопротивления (рис. 2.2, б). Здесь $r_1 r_2 = r_x r_3$ откуда $r_x = r_1 r_2 / r_3$. В общем случае совпадение сравниваемых величин регистрируется нуль-индикатором (И).



Кроме того, можно выделить **нестандартизованные методы**:

- **метод противопоставления**, при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения. Например, измерения массы на равноплечих весах с помещением измеряемой массы и уравновешивающих ее гирь на двух чашках весов;

- **метод совпадений**, где разность между сравниваемыми величинами измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Например, при измерении длины штангенциркулем наблюдают совпадение отметок на шкалах штангенциркуля и нониуса; при измерении частоты вращения стробоскопом – метки на вращающемся объекте с момента вспышек известной частоты.

Выбор метода зависит от его теоретической проработки, конкретных средств измерений. Например, для решения такой измерительной задачи, как определение высоты телебашни, можно использовать один из следующих методов:

- измерить высоту телебашни рулеткой (метод сравнения с мерой);
- на вертолете подняться до уровня телебашни и определить расстояние по высотомеру (метод непосредственной оценки);
- вычислить высоту телебашни, используя тригонометрические функции прямоугольного треугольника, т. е. измеряя горизонтальное расстояние до телебашни и вертикальный угол, образованный основанием и вершиной телецентра (метод косвенных измерений).

Методы измерений предусматривают разработку основных приемов применения средств измерений, а методика их проведения представляет собой требования к выбору средств измерений, последовательность выполнения операций, соблюдение установленных условий измерений, числа измерений, способов обработки их результатов.

Строгое определение понятия методика измерений стандартами не определено, однако, с учетом имеющегося опыта разработок методик измерений в стране его можно сформулировать так: **методика измерений** — это установленная совокупность операций и правил, выполнение которых при измерении обеспечивает получение результатов измерений в соответствии с данным методом.

2.5 Результаты измерений

Измерение — это процесс, завершающим этапом которого является результат измерений. Например, токарь в процессе изготовления детали периодически для контроля проводит измерения с помощью штангенциркуля; на основании получаемых результатов он принимает решение о дальнейшей обработке детали. Результатом измерений является именно значение величины, которое удалось получить при помощи того или иного средства измерений.

В результате измерения должны быть определены три величины:

- 1) число, выражающее отношение измеряемой физической величины к общепринятой единице измерения,

$$A = \frac{X}{x},$$

где A – числовое значение измеряемой величины; X – измеряемая величина; x – единица измерения;

- 2) погрешность результата измерения;

- 3) доверительная вероятность допущенной погрешности (при обычных технических измерениях погрешность определяется с вероятностью 95 %).

Доверительная вероятность допущенной погрешности зависит от важности производимых измерений (чем более важны и ответственны измерения, тем более высокая доверительная вероятность допущенной погрешности должна быть задана).

Часто в полученный результат измерения вводят поправки, поэтому значение величины до и после введения поправки будет различным. Это находит отражение в применяемой терминологии.

Неисправленный результат измерения — значение физической величины, полученное при помощи средств измерений до введения поправок; **исправленный результат измерения** — значение физической величины, полученное при помощи средств измерений и уточненное путем введения в него необходимых поправок.

В отдельных случаях результат измерений имеет небольшое значение, в других случаях результат измерений играет исключительно большую роль. Например, неправильный результат измерения давления у человека может сказаться на его здоровье. Диапазон значимости целей, для которых проводятся измерения, определяет диапазон требований, предъявляемых к качеству измерений.

К основным характеристикам качества измерений относятся точность, правильность, сходимость и воспроизводимость.

Точность измерений — качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины.

Правильность измерений — качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в их результатах.

Сходимость измерений — качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях повторно одними и теми же средствами измерений, одним и тем же методом.

Воспроизводимость измерений — качество измерений, отражающее близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях (в различное время, в различных местах, различными методами и средствами).

В практике метрологических работ широко используется также термин **«достоверность измерений»**, по существу являющийся синонимом термина «точность измерения».

Даже самое тщательное проведение измерения вне зависимости от его точности и метода не позволяет получить истинного значения измеряемой величины. Так как истинное значение измеряемой величины остается неизвестным, а при проведении повторных измерений мы несколько приближаемся к нему, то для оценки степени приближения к истинному значению используются положения теории вероятностей. Эта теория дает возможность оценивать вероятностные границы погрешностей, за пределы которых они не выходят.

Достоверность измерений характеризует степень доверия к полученным результатам измерений. Это позволяет для каждого конкретного случая выбирать методы и средства измерений, обеспечивающие получение результата с заданной точностью.