

ЛЕКЦИЯ 6

4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

План лекции

4.1. Средства измерений.

4.2. Метрологические характеристики измерительных приборов.

4.1. Средства измерений

Неотъемлемой частью экспериментальных исследований являются средства измерений, т.е. совокупность технических средств (имеющих нормированные погрешности), которые дают необходимую информацию для эксперимента.

К средствам измерений относят измерительный инструмент, измерительные приборы и установки. Измерительные средства делят на образцовые и технические.

Образцовые средства являются эталонами. Они предназначены для проверки для проверки технических, т. е. рабочих средств.

Передача размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений рабочим средствам осуществляется государственными и ведомственными метрологическими органами, составляющими отечественную метрологическую службу, их деятельность обеспечивает единство измерений и единообразие средств измерений в стране. Основоположником метрологической службы и метрологии как науки в России был великий русский ученый Д. И. Менделеев, создавший в 1893 г. Главную Палату мер и весов, которой проведена, в частности, большая работа по внедрению метрической системы в стране (1918 – 1927).

Измерительным прибором называют средство измерения, предназначенное для получения информации об изучаемой величине в удобной для экспериментатора форме. В этих приборах измеряемая величина преобразуется в показание или сигнал. Они состоят из двух основных узлов: воспринимающего сигнал и преобразующего в показание.

Выходной сигнал средств измерения фиксируется отсчетными устройствами, которые бывают показывающими (шкальными, цифровыми) и регистрирующими.

Наибольшее распространение получили *показывающие* (шкальные) аналоговые приборы, отсчетные устройства которых состоят из шкалы и указателя. Эти приборы дают показания без каких-либо дополнительных операций экспериментатора. Однако они имеют большие погрешности, чем цифровые. Более удобны показывающие цифровые приборы (электронные), в которых отсчетный механизм фиксирует измеряемую величину в виде цифр.

Регистрирующие приборы бывают самопишущими и печатными. Самопишущие приборы, например шлейфовый осциллограф, выдают график измерений. Печатные приборы выдают измерения в печатном виде на бумаге или ленте. Приборы также классифицируют по точности измерений, стабильности показаний, чувствительности, пределам измерения и др.

Измерительная установка (стенд) представляет собой систему, состоящую из основных и вспомогательных средств измерений, предназначенных для измерения одной или нескольких величин. Установки включают в себя различные средства измерений и преобразователи, предназначенные для одно- или многоступенчатого преобразования сигнала до такого уровня, чтобы можно было зафиксировать его измерительным механизмом. Преобразователи, которые увеличивают в несколько раз на выходе величину без изменения ее физической сущности, называют масштабными (трансформаторы, электронные усилители и др.). Имеются также преобразователи, которые входной сигнал могут преобразовывать, меняя его физическую сущность. Так, электромеханический преобразователь преобразовывает электрический сигнал на входе в механический на выходе или наоборот. Один прибор может иметь несколько преобразователей, изменяющих на выходе измеряемую величину в различных диапазонах, удобных при измерении определенной величины.

4.2. Метрологические характеристики измерительных приборов

Шкала является важной частью большинства приборов. Разность между значениями двух смежных отметок на шкале называют *ценой деления шкалы*. Разность между значениями, соответствующими началу и концу шкалы, называют *диапазоном показаний прибора*.

Другой характеристикой прибора является его *чувствительность*, т. е. способность отсчитывающего устройства реагировать на изменения измеряемой величины. Под порогом чувствительности прибора понимают наименьшее значение измеренной величины, вызывающее изменение показания прибора, которое можно зафиксировать.

Стабильность (воспроизводимость прибора) – это свойство отсчетного устройства обеспечивать постоянство показаний одной и той же величины. Со временем в результате старения материалов стабильность показаний приборов нарушается.

Под *регулировкой* прибора понимают операции, направленные на снижение систематических ошибок до величины, меньшей допустимой погрешности. Измерительные приборы обычно снабжены двумя узлами для регулировки нуля и чувствительности. Регулировка нуля предназначена для устранения систематических ошибок в диапазоне нижнего предела измерений.

Градуировкой (тарировкой) датчика или прибора называют получение зависимости для сигнала на выходе датчика y от измеряемого параметра x на входе. Т.е. под градуировкой понимают нанесение меток на шкалу отсчитывающего устройства по заранее известной измеренной величине. Так для вновь изготовленного вольтметра напряжение, подаваемое на вход, является входным параметром x (контролируется эталонным прибором), а сигнал на выходе вольтметра y , считываемый по показаниям стрелки в делениях шкалы, называется выходным сигналом. Влияние всевозможных погрешностей приводит к тому, что если полученные значения x_i и y_i нанести на график, то точки разместятся в границах некоторой *полосы погрешностей* тарировки.

В связи с этим возникает необходимость осреднения полученных данных (и “сглаживания” случайных отклонений) с целью получения “средней” зависимости $y = f(x)$ (рис. 4.1).

Для решения подобных задач применяется *метод наименьших квадратов отклонений*, который позволяет при заданном типе зависимости $y = f(x)$ так подобрать ее числовые коэффициенты, чтобы сумма квадратов отклонений Δ_i^2 всех экспериментальных точек от “средней” кривой $y=f(x)$ была минимальна.

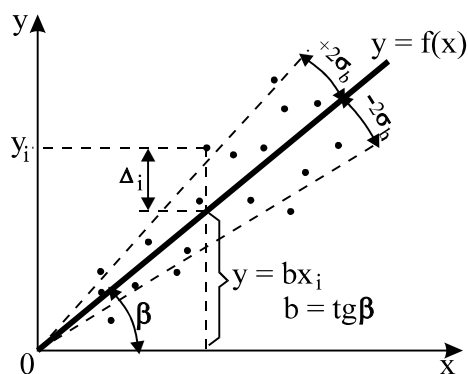


Рис. 4.1. Получение градуировочной зависимости прибора

В качестве градуировочной зависимости используется обычно полином:

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \dots,$$

где a, b, c, d, \dots – неизвестные коэффициенты.

В качестве примера рассмотрим простую линейную зависимость, проходящую через начало координат:

$$y = bx.$$

В соответствии с методом наименьших квадратов коэффициент b в этом уравнении определяется из условия минимума суммы квадратов отклонений Δ_i^2 всех экспериментальных точек от “среднего” графика $y = bx$ (см. рис. 4.1):

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - bx_i)^2 = \min. \quad (4.1)$$

Минимум S соответствует нулевому значению первой производной по коэффициенту b , то есть

$$\frac{dS}{db} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - bx_i)x_i = -2 \sum_{i=1}^n x_i y_i + 2b \sum_{i=1}^n x_i^2 = 0, \text{ откуда}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (4.2)$$

Среднее квадратическое отклонение величины b (рис. 4.1):

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{S_{\min}}{(n-2) \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 + \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n} \right)}}$$

где S_{\min} – вычисляется по формуле (4.1); n – число точек.

В зависимости от характера полосы погрешностей различают три типа приборов.

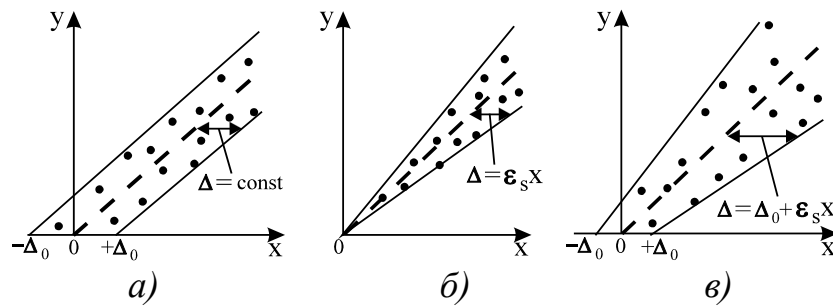


Рис. 4.2. Характер полосы погрешностей приборов

а). Если границы полосы параллельны друг другу, как это показано на рис. 4.2, а, т.е. абсолютная погрешность во всем диапазоне измерений ограничена постоянным (не зависящим от x) пределом $\pm\Delta_0$, то погрешности такой полосы называются *аддитивными*, т.е. *суммирующимися*. Они могут быть как систематическими: неточная установка стрелки прибора на нуль перед измерениями, влияние термо-э.д.с. в цепях постоянного тока и т.п., так и случайными: наводки переменной э.д.с. на вход прибора, трение на оси стрелки прибора, ненадежный электрический контакт и т.п. Общим для аддитивных погрешностей является то, что они не зависят от величины сигнала x , т.е. $\Delta = \Delta_0 = \text{const}$,

Несмотря на то, что эта величина при аддитивных погрешностях постоянна, указывать ее в паспорте прибора (нормировать) неудобно, так как для

многопредельных приборов значение Δ_0 , измеренное в единицах входной величины x , будет различным для каждого диапазона измерений. Поэтому нормируют не абсолютное, а так называемое приведенное значение этой погрешности

$$\varepsilon_0 = \frac{\Delta_0}{x_d},$$

где x_d – протяженность использованного диапазона измерений (длина шкалы прибора).

Величина ε_0 постоянна для всех точек диапазона, кроме того в большинстве случаев она одинакова для всех диапазонов измерений прибора. По действующим стандартам округленное предельное значение ε_0 , %, для приборов с преобладанием аддитивных погрешностей названо *классом точности прибора* и изображается числом *без рамки* на его шкале (например, ... 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; ...).

б). Если полоса погрешностей градуировки имеет вид, показанный на рис. 4.2, б, то такие погрешности называются *мультипликативными* (их нужно умножать, а не складывать) или погрешностями чувствительности – нестабильность чувствительности прибора меняет наклон градуировочной линии (пунктир) в пределах заштрихованной зоны. Причинами таких погрешностей могут быть нестабильность коэффициента усиления транзисторов, изменение жесткости пружины стрелочного механизма вольтметра и т.п. Их удобно характеризовать не абсолютной погрешностью Δ (рис. 4.3, б), которая меняется пропорционально текущему значению x измеряемой величины, а относительной погрешностью чувствительности

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta}{x} = \text{const.} \quad (4.3)$$

По действующим нормам округленное предельное значение ε_s , %, для приборов с преобладанием мультипликативных погрешностей названо *классом точности прибора* и изображается числом в *круглой рамке* на его шкале.

в). Если аддитивные и мультипликативные погрешности соизмеримы и играют одинаково важную роль, то полоса погрешностей имеет трапецевидную форму (рис. 4.2, в). Текущее значение абсолютной погрешности

$$\Delta = \Delta_0 + \varepsilon_s x, \quad (4.4)$$

где Δ_0 – аддитивная, а $\varepsilon_s x$ – мультипликативная составляющие абсолютной погрешности (рис. 4.2, в).

Если обе части этого выражения разделить на текущее значение измеряемой величины x , то получим относительную погрешность результата измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{x} = \frac{\Delta_0}{x} + \varepsilon_s = \varepsilon_0 \frac{x_d}{x} + \varepsilon_s, \quad (4.5)$$

где $\varepsilon_0 = \Delta_0/x_d$ – приведенная погрешность в начале диапазона измерений (при $x = 0$). Для сложных электронных приборов предельное значение относительной погрешности нормируется в паспортных данных в виде зависимости (3.5).

Максимально допускаемая при эксплуатации прибора погрешность ε_0 (или ε_s) устанавливается для нормальных (основных) условий его эксплуатации: температура воздуха 20 ± 5 °С, относительная влажность 65 ± 15 %. В связи с этим ее называли *пределом допускаемой основной погрешности прибора*. Если выясняется, что основная погрешность прибора больше этого предела, его немедленно снимают с измерений. Наиболее распространенным способом проверки приборов и оценки его эксплуатационных характеристик является способ сравнения. Суть его сводится к сопоставлению поверяемого прибора с образцовым при измерении одной и той же величины. По отсчетам судят о погрешностях, которые имеет поверяемый прибор.

Часто в паспорте прибора указывается также *предел допускаемой дополнительной погрешности*: например, $1/2$ предела основной погрешности при отклонении температуры на каждые 10 °С от нормальных условий. Это позволяет учесть суммированием этих погрешностей реальные условия эксплуатации прибора.

На все измерительные приборы в той или иной мере действует *магнитное поле*. Поэтому ряд электроизмерительных приборов должен быть защищен от действия магнитного поля, а также электростатических явлений. В специальной метрологической литературе разработаны схемы защит I (более высокая) и II категорий.

В последние годы при исследованиях различных процессов стали широко применяться электрические, электронные, частотные, радиоизотопные и другие приборы. Такие приборы, как правило, требуют дополнительной защиты от пыли, вибрации, газа, света и др. Отсутствие такой защиты может вызвать погрешности, превышающие допустимые. Все средства измерения (приборы, используемые для измерения в научных исследованиях) проходят *периодическую поверку* на точность. Такая поверка предусматривает определение и по возможности уменьшение погрешностей приборов. Поверка позволяет установить соответствие данного прибора регламентированной степени точности и определяет возможность его применения для данных измерений, т. е. определяют погрешности и устанавливается, не выходят ли они за пределы допустимых значений.

Таким образом, метрологическое обеспечение научных исследований и особенно обеспечение единства измерений и единообразия средств измерения является важнейшим фактором успешного проведения научных исследований.