

## ЛЕКЦИЯ 5. ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения как экспериментальные процедуры определения значений измеряемых величин весьма разнообразны, что объясняется множеством измеряемых величин, различным характером их измерения во времени, различными требованиями к точности измерений и т. д. Существует несколько видов измерений. Их можно классифицировать по нескольким признакам, наиболее важные из которых отражены на рис. 5.1.

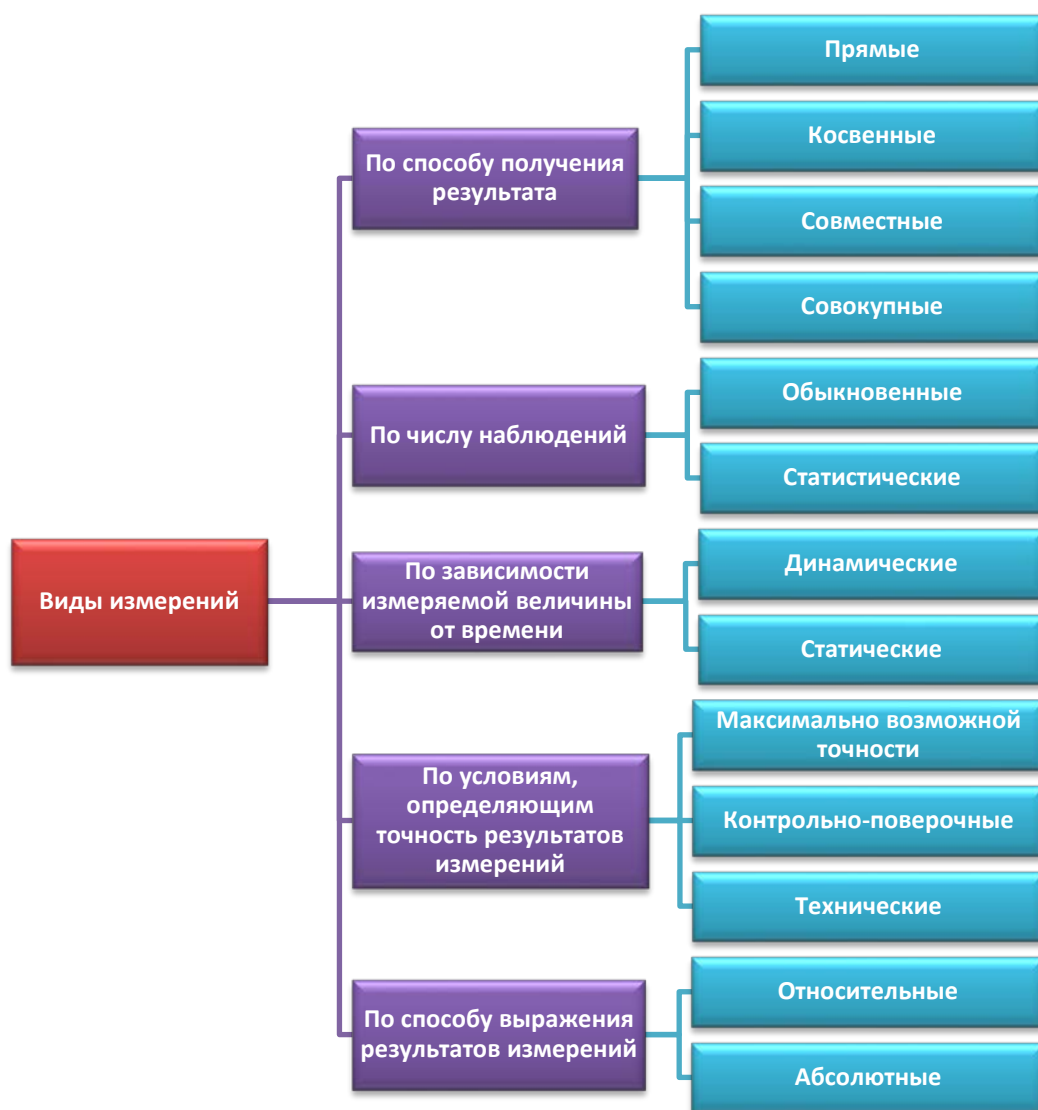


Рис. 5.1. Классификация видов измерений

В зависимости от способа получения результатов все измерения делятся на четыре вида: прямые, косвенные, совместные и совокупные.

**Прямое измерение** – измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных в результате выполнения измерения. Примерами прямых измерений служат измерения длины тела

Вначале измеряют электрическое сопротивление проводника при одной температуре  $R=R_1$  при  $t_1$ , затем делают аналогичный замер при другой температуре  $R=R_2$  при  $t_2$ . После этого составляют систему из двух уравнений, из которых находят искомые параметры  $R_0$  и  $A$  зависимости.

**Пример:** Требуется определить сопротивление медного провода при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  и температурный коэффициент сопротивления меди  $\alpha$  в диапазоне от  $0 \div 100^{\circ}\text{C}$ .

Измерения сопротивления медного проводника при температурах  $t_1=20^{\circ}\text{C}$  и  $t_2=90^{\circ}\text{C}$  дали значения  $R_1=108,56$  Ом и  $R_2=138,52$  Ом соответственно. Подставив измеренные значения физических величин в уравнение получаем,

$$\begin{cases} R_0(1 + \alpha 20) = 108,56 \\ R_0(1 + \alpha 90) = 138,52 \end{cases}$$

Данная система уравнений довольно просто решается известными математическими методами. Например, разделив первое уравнение системы на второе получим,

$$\frac{1 + 20\alpha}{1 + 90\alpha} = \frac{108,56}{138,52}$$

откуда следует

$$1 + 20\alpha = 0,7837(1 + 90\alpha)$$

раскрыв скобки в правой части получим уравнение

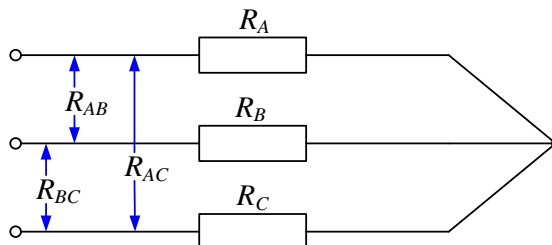
$$1 + 20\alpha = 0,7837 + 70,5342\alpha$$

из которого следует, что  $\alpha = 0,00428$ .

Подставляя в любое из уравнений исходной системы полученный коэффициент и решая его, получаем значение  $R_0 = 100$  Ом.

**Совокупные измерения** – это производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомую величину определяют решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. Приведем два примера совокупных измерений.

Первым примером является измерение сопротивлений резисторов, соединенных звездой, путем измерений сопротивлений между «лучами» звезды, не используя общую точку соединения резисторов. Такое измерение часто бывает необходимо для определения электрического сопротивления линий связи термопреобразователя сопротивления с вторичным прибором с целью их последующей подгонки.



**Рис. 5.2. Определение сопротивления линий при помощи совокупных измерений**

Значения электрических сопротивлений  $R_{AB}$ ,  $R_{BC}$ ,  $R_{AC}$ , полученные в результате прямых измерений подставляют в приведенные ниже уравнения и решая систему этих уравнений получают значения сопротивлений линий  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$ .

$$\begin{cases} R_A + R_B = R_{AB} \\ R_B + R_C = R_{BC} \\ R_A + R_C = R_{AC} \end{cases}$$

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

Пусть, например, 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). Калибровка состоит в определении массы каждой гири по одной образцовой гире, например по гире массой 1 кг и образцовых грузиков небольшой массы.

Для этого проведем измерения, меняя каждый раз комбинацию гирь на равноплечих рычажных весах ( $M_1, M_2, M_2^*, M_5, M_{10}, M_{20}$  – массы отдельных калибруемых гирь;  $1_{об}$  – масса образцовой гири в 1 кг).

$$\begin{cases} M_1 = 1_{об} + a \\ M_1 + 1_{об} = M_2 + b \\ M_2^* = M_2 + c \\ M_1 + M_2 + M_2^* = M_5 + d \text{ и т. д.} \end{cases}$$

$a, b, c$  и  $d$  – массы образцовых грузиков, 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.

По числу наблюдений измерения подразделяются на **обыкновенные** и **статистические**.

**Обыкновенные (однократные) измерения** – измерения, выполняемые один раз (с однократным наблюдением).

**Статистические (многократные) измерения** – измерения одного и того же размера величины, результат которого получают из нескольких следующих друг за другом однократных измерений (с многократными наблюдениями).

С какого числа можно считать измерения многократными? Строгого ответа на этот вопрос нет. Однако известно, что с помощью таблиц статистических распределений ряд измерений может быть обработан по правилам математической статистики при числе наблюдений  $n \geq 4$ . Поэтому считается, что измерение можно считать многократным при числе наблюдений не менее 4. Во многих случаях, особенно в быту, выполняются именно однократные измерения. Например, измерение конкретного момента времени по часам обычно производится один раз. Однако при некоторых измерениях для уверенности в получаемом результате одного отсчета недостаточно. Поэтому часто и в быту рекомендуется проводить не одно, а несколько измерений.

Например, ввиду нестабильности артериального давления человека при его контроле целесообразно проводить два или три измерения и за результат принимать их медиану. От многократных измерений двукратные и трехкратные измерения отличаются тем, что их точность не имеет смысла оценивать статистическими методами.

По характеру зависимости измеряемой величины от времени измерения разделяются на **динамические** и **статические**.

**Динамические измерения** – измерения величин, размер которых изменяется с течением времени.

Быстрое изменение размера измеряемой величины требует ее измерения с точной фиксацией момента времени. Например, измерение расстояния до уровня земли со снижающегося самолета или измерение переменного напряжения электрического тока. По существу динамическое измерение является измерением функциональной зависимости измеряемой величины во времени.

**Статические измерения** – измерения величин, принимаемых в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменные на протяжении времени измерения.

Например, измерение линейного размера изготовленной детали при нормальной температуре можно считать статическим, поскольку колебания температуры в цехе на уровне десятых долей градусов вносят погрешность измерений не более 10 мкм/м, несущественную по сравнению с погрешностью изготовления детали. Поэтому в этой измерительной задаче можно считать измеряемую величину неизменной. При калибровке штриховой меры длины на государственном первичном эталоне термостатирование обеспечивает стабильность поддержания температуры на уровне 0,005°C. Такие колебания температуры обуславливают в тысячу раз меньшую погрешность измерения – не более 0,01 мкм/м. Но в данной измерительной задаче она является существенной, и учет изменений температуры в процессе измерений становится условием обеспечения требуемой точности измерений. Поэтому эти измерения следует проводить по методике динамических измерений.

По условиям, определяющим точность результатов, измерения бывают: **максимально возможной точности**, **контрольно-поверочные** и **технические**.

**Измерения максимальной точности** – это измерения с точностью максимально достижимой при существующем уровне техники.

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

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

К ним относятся измерения, выполняемые лабораториями государственной метрологической службы и производственными метрологическими лабораториями, осуществляемые такими средствами измерений и по такой методике, которые гарантируют погрешность результата с определенной вероятностью, не превышающую некоторого, заранее заданного значения.

**Технические измерения** – это измерения в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерения.

Технические измерения являются наиболее распространенными и выполняются во всех отраслях хозяйства и науки. К ним, в частности, относятся и технологические измерения.

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

**Относительные измерения** – это измерения отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

**Абсолютные измерения** – это измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких *основных* величин и (или) использовании значений физических констант.

Например измерение силы с помощью динамометра будет относительным измерением, а ее измерение путем использования физической константы  $g$  (ускорение свободного падения) и мер массы (основной величины СИ) – абсолютным.

При проведении абсолютных измерений в распоряжении экспериментатора не имеется единицы измеряемой величины. В связи с этим приходится ее воспроизводить непосредственно в процессе измерений. Это возможно двумя способами:

- получать «непосредственно из природного мира», т. е. воспроизводить ее на основе физических законов и фундаментальных физических констант (такое измерение в международном словаре метрологических терминов VIM называется фундаментальным измерением);
- воспроизводить единицу на основании известной зависимости между нею и единицами других величин.

Внедрение и метрологическое обеспечение относительных измерений, как правило, являются наилучшим решением многих измерительных задач, поскольку они являются наиболее простыми, точными и надежными, чем абсолютные измерения. Абсолютные измерения на практике должны применяться в виде исключения. Их сфера применения – независимое воспроизведение основных единиц СИ и открытие новых физических закономерностей.

Взаимодействие средств измерений с объектом основано на физических явлениях, совокупность которых составляет **принцип измерений**.

**Принцип измерений** – физическое явление или эффект, положенный в основу измерений тем или иным средством измерений.

Примерами принципов измерений являются:

- применение эффекта Джозефсона для измерений электрического напряжения;
- применение эффекта Доплера для измерения скорости;
- применение силы тяжести при измерении массы взвешиванием;
- зависимость сопротивления платины от температуры, реализованная в платиновых термометрах сопротивления;
- зависимость термоЭДС от разности температур, реализованная в термоэлектрических преобразователях.

Получить значение физической величины, используя тот или иной принцип измерения можно разными способами по другому **методами измерений**.

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

Методы измерений весьма разнообразны. Их можно классифицировать по различным признакам. Более общей является метрологическая классификация методов измерений, под которой понимается классификация по способу сравнения измеряемой величины с единицей. По этому признаку все методы измерений разделяют на два метода:

**Метод непосредственной оценки** – метод при котором значение величины получают непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого преобразования, шкала которого заранее была отградуирована с помощью многозначной меры, воспроизводящей известные значения измеряемой величины. В приборах прямого преобразования в процессе измерения оператором производится сравнение положения указателя отсчетного устройства и шкалы, по которой производится отсчет. Измерение силы тока с помощью амперметра – пример измерения по методу непосредственной оценки.



Рис. 5.3. Функциональная схема метода непосредственной оценки

**Метод сравнения с мерой** – метод при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Сравнение может быть непосредственным или опосредованным через другие величины, которые однозначно связаны с первыми. Отличительной чертой метода сравнения с мерой является непосредственное участие в процессе измерения меры известной величины, однородной с измеряемой. Примером метода сравнения с мерой служит измерение массы на рычажных весах.

Метод сравнения с мерой имеет ряд разновидностей:

- 1) Дифференциальный метод;
- 2) Нулевой метод;
- 3) Метод замещения;
- 4) Метод совпадения.

*Дифференциальный метод* представляет собой метод измерения, в котором на измерительный прибор воздействует разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой, причем эта разность не доводится до нуля, а измеряется измерительным прибором прямого действия. Результат измерения получается сложением значения величины воспроизведенной мерой и измеренной разности. Метод позволяет получить результат высокой точности при использовании относительно грубых средств измерения. На рис. 5.4 показана функциональная схема дифференциального метода.

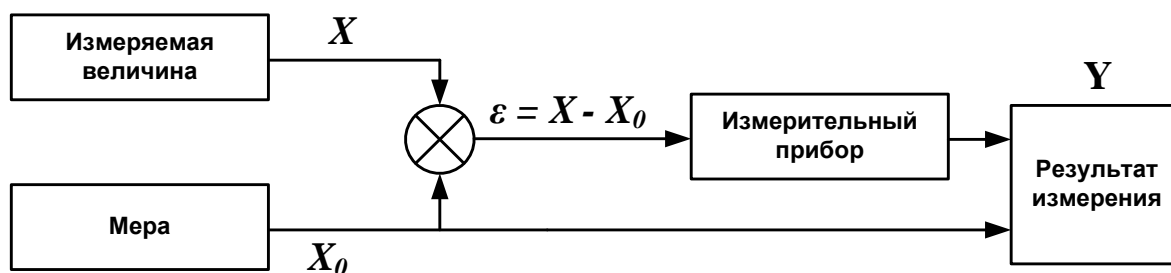
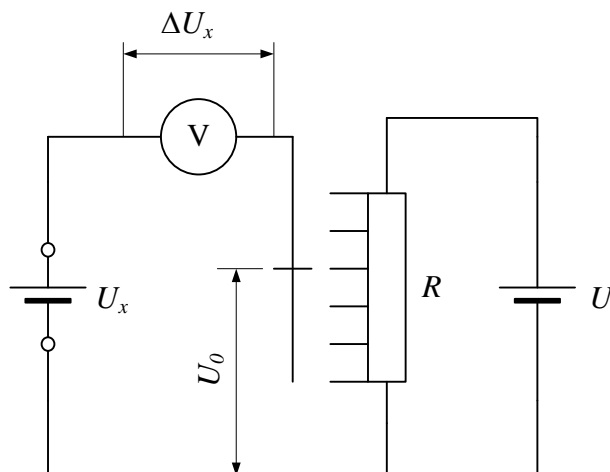


Рис. 5.4. Функциональная схема дифференциального метода измерений

Здесь мера имеет постоянное значение  $X_0$ , разность измеряемой величины  $X$  и меры  $\varepsilon = X - X_0$ , не равна нулю и измеряется измерительным прибором. Результат измерения находится как  $Y = X_0 + \varepsilon$ . То обстоятельство, что измерительный прибор здесь измеряет не всю величину  $X$ , а только её часть  $\varepsilon$ , позволяет уменьшить влияние на результат измерения погрешности измерительного прибора, причем влияние погрешности измерительного прибора тем меньше, чем меньше разность  $\varepsilon$ . Дифференциальный метод – это первый точный метод, который люди начали применять еще в древности.

В качестве примера измерения с использованием этого метода приведем измерение напряжения  $U_x$  постоянного тока с помощью дискретного делителя  $R$  напряжения  $U$  и вольтметра  $V$ . Упрощенная схема представлена на рис.5.5. Неизвестное напряжение  $U_x = U_0 + \Delta U_x$ ,  $\Delta U_x$  – измеренная разность напряжений.





**Рис. 5.5. Схема измерения напряжения при использовании дифференциального метода**

Так при измерении напряжения  $U_x = 98$  В вольтметром непосредственной оценки с пределом измерения 100 В и допущенной относительной погрешности измерения этого напряжения 1 % (0,01) мы получаем абсолютную погрешность измерения  $\Delta_1 = 98 \times 0,01 = 0,98$  В.

Если же будем измерять это напряжение дифференциальным методом с использованием образцового источника напряжения  $U_0 = 100$  В, то разность напряжений  $\Delta U_x = U_x - U_0 = (98 - 100) = -2$  В мы можем измерить вольтметром с пределом измерения всего 3 В. Пусть относительная погрешность измерения этого напряжения будет также равна 1 %. Это даёт абсолютную погрешность измерения напряжения  $\Delta_2 = 2 \times 0,01 = 0,02$  В. Если эту погрешность привести к измеряемому напряжению  $U_x$ , мы получим относительную погрешность измерения напряжения:  $\Delta_2/U_x = 0,02/98 = 0,0002$  (0,02 %), т.е. в 50 раз меньше, чем при измерении напряжения  $U_x$  методом непосредственной оценки. Это увеличение точности измерения произошло потому, что в первом случае прибором была измерена почти вся величина с относительной погрешностью в 1 %, а во втором случае измеряется не вся величина, а только её 1/50 часть (в этих расчетах не учитывалась погрешность меры, которая полностью входит в результат измерения).

*Нулевой метод* измерения является частным случаем дифференциального метода. При нулевом методе разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой, сводится в процессе измерения к нулю, что фиксируется высокочувствительным прибором – нуль-индикатором. При высокой точности мер, воспроизводящих известную величину, и высокой чувствительности нуль-индикатора может быть достигнута высокая точность измерений.

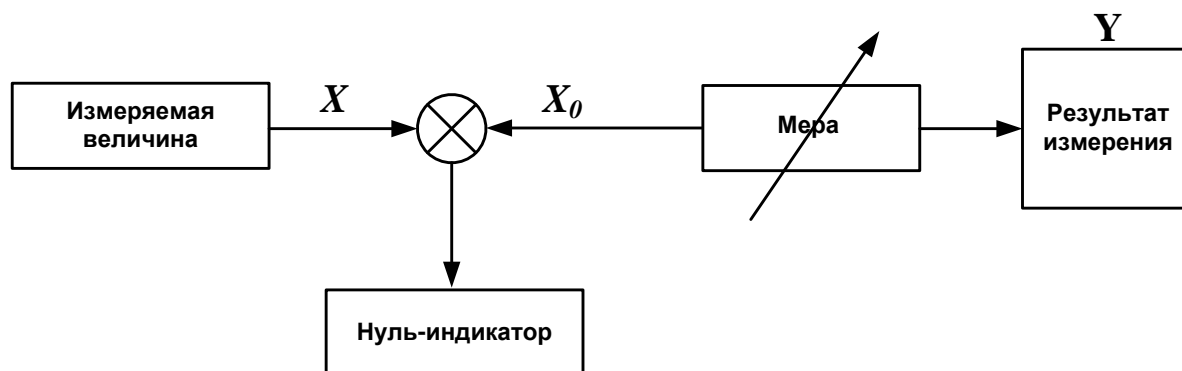


Рис. 5.6. Функциональная схема нулевого метода измерений

Примером применения нулевого метода является измерение сопротивления резистора с помощью четырех-плечевого моста, в котором падение напряжения на резисторе с неизвестным сопротивлением уравнивается падением напряжения на резисторе известного сопротивления.

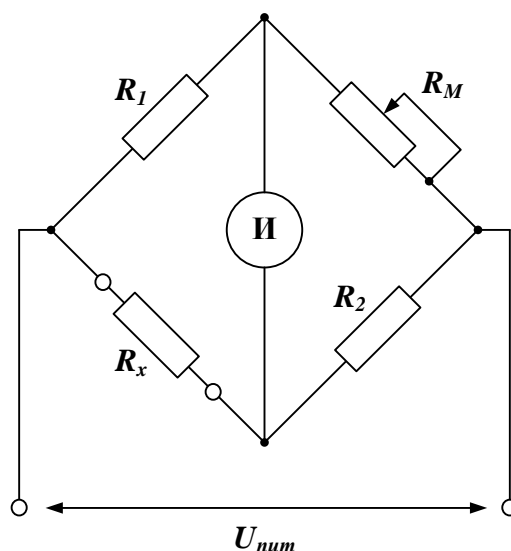


Рис. 5.7. Схема электрического моста

При *методе замещения* производится поочередное подключение на вход прибора измеряемой величины и известной величины, представленной мерой, и по двум показаниям оценивается значение неизвестной величины. Наименьшая погрешность измерения получается в том случае, когда в результате подбора известной величины прибор дает тот же выходной сигнал, что и при неизвестной величине. При этом методе может быть получена высокая точность измерений при высокой точности меры известной величины и высокой чувствительности прибора.

Функциональная схема метода замещения приведена на рис. 5.8.

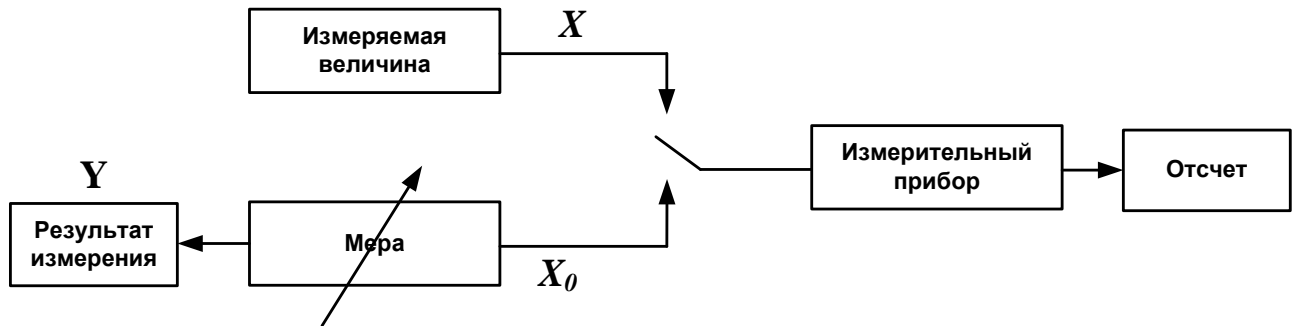


Рис. 4.8. Функциональная схема метода замещения

Здесь используется измерительный прибор непосредственной оценки. Техника измерения состоит в следующем. Сначала на вход измерительного прибора подают измеряемую величину  $X$  и отмечают показания прибора (отсчет)  $Y_1$ . После этого вместо измеряемой величины на тот же самый вход (это очень существенно) прибора подают величину  $X_0$ , воспроизводимую мерой. В этом случае показание прибора становится равным  $Y_2$ . Изменяя величину, воспроизводимую мерой, добиваются равенства показаний, т.е.  $Y_1 = Y_2$ . При этом можно утверждать, что  $X = X_0$  независимо от погрешности измерительного прибора. Действительно, в первом случае получаем  $Y_1 = X + \Delta_1$ , где  $\Delta_1$  – погрешность измерительного прибора при получении отсчета  $Y_1$ . При воздействии на прибор меры  $Y_2 = X + \Delta_2$ . Здесь  $\Delta_2$  – погрешность измерительного прибора при получении отсчета  $Y_2$ . Поскольку добиваются одинаковых показаний ( $Y_1 = Y_2$ ), а интервал времени между двумя измерениями невелик, то на одной и той же отметке шкалы прибора погрешность одинакова, т.е.  $\Delta_1 = \Delta_2$ . Следовательно, из равенства  $Y_1 = Y_2$  или  $X + \Delta_1 = X + \Delta_2$  вытекает, что  $X = X_0$ .

Исключение погрешности измерительного прибора из результата измерений является достоинством метода замещения. В нулевом методе измерения погрешность измерительного прибора проявляет себя тем, что нулевое показание может не соответствовать равенству измеряемой величины и меры, а в дифференциальном методе она представляет собой погрешность измерения разности меры и измеряемой величины. Для получения большой точности измерения нулевым и дифференциальным методом необходимо, чтобы погрешности измерительных приборов были невелики. А вот метод замещения не требует этого условия! Даже если погрешность измерительного прибора достаточно велика, это не скажется на результате измерения. Таким образом, методом замещения можно осуществить точное измерение, имея прибор с большой погрешностью. Нетрудно сообразить, что точность измерения методом замещения определяется погрешностью меры. Правда, при более строгом подходе к методу замещения следует учитывать два обстоятельства.

Во-первых, здесь сравнение разновременное, а за время между двумя измерениями погрешность измерительного прибора может несколько измениться, так что равенство  $\Delta_1 = \Delta_2$  несколько нарушится. Теперь становится ясно, почему измеряемая величина и мера должны подаваться на один и тот же вход прибора. Это прежде всего связано с тем, что погрешность измерительного прибора на разных входах даже при одинаковых показаниях может быть разной!

Во-вторых, метод замещения сводится к получению одинаковых показаний прибора. Само равенство показаний может быть установлено с конечной точностью. А это также ведет к погрешности измерения. Точность установления равенства показаний будет больше в приборе, обладающем большей чувствительностью. Следовательно, при измерении методом замещения следует использовать не точный, но чувствительный и быстродействующий прибор, как это и было отмечено выше. Тогда остаточная погрешность, обусловленная измерительным прибором, будет невелика.

Метод замещения является самым точным из всех известных методов и обычно используется для проведения наиболее точных (прецизионных) измерений. Ярким примером метода замещения является взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов (вспомните - на один и тот же вход прибора). Известно, что таким методом можно правильно измерить массу тела, имея неверные весы (погрешность прибора), но никак не гири! (погрешность меры).

Сравнивая между собой метод замещения и метод непосредственной оценки, мы обнаружим их разительное сходство. Действительно, метод непосредственной оценки по своей сути представляет метод замещения. Почему он выделен в отдельный метод? Все дело в том, что при измерении методом непосредственной оценки мы выполняем только первую операцию – определение показаний. Вторая операция – сравнение с мерой производится не при каждом измерении, а лишь в процессе производства прибора и его периодических калибровках. Между применением прибора и его предыдущей калибровкой может лежать большой интервал времени, а погрешность измерительного прибора за это время может значительно измениться. Это и приводит к тому, что метод непосредственной оценки дает обычно меньшую точность измерения, чем метод сравнения с мерой.

*Метод совпадений* или (метод «нониуса») представляет собой метод сравнения с мерой, в котором измеряют разность между измеряемой величиной и величиной воспроизводимой мерой, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

Этот метод применяется в тех случаях, когда измеряемая величина меньше цены деления заданной меры. При этом применяются две меры с разными ценами деления, которые отличаются на размер оцениваемого разряда отсчетов.

Пусть имеем одну калиброванную меру с ценой деления  $\Delta x_{K1}$  и измеряемую величину  $\Delta x$ , которая меньше цены деления. В этом случае исполь-

зуют вторую меру с ценой деления  $\Delta x_{K2}$ . Таким образом, если чувствительность необходимо увеличить в  $n$  раз, то соотношение между ними будет иметь вид

$$\Delta x_{K2} = \Delta x_{K1} - \Delta x_{K1}/n = \Delta x_{K1} \cdot (1 - 1/n).$$

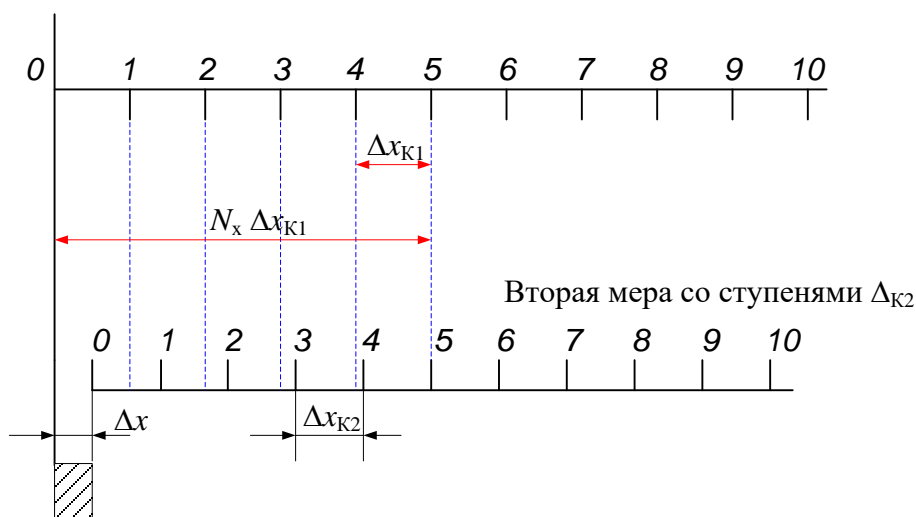
В частности, при  $n = 10$   $\Delta x_{K2} = 0,9 \Delta x_{K1}$ .

Измеряемую величину  $\Delta x$  устанавливают между нулевыми отметками мер и находят число  $N_x$ , равное номеру совпавших делений мер (рис. 5.9).

В этом случае справедливо соотношение

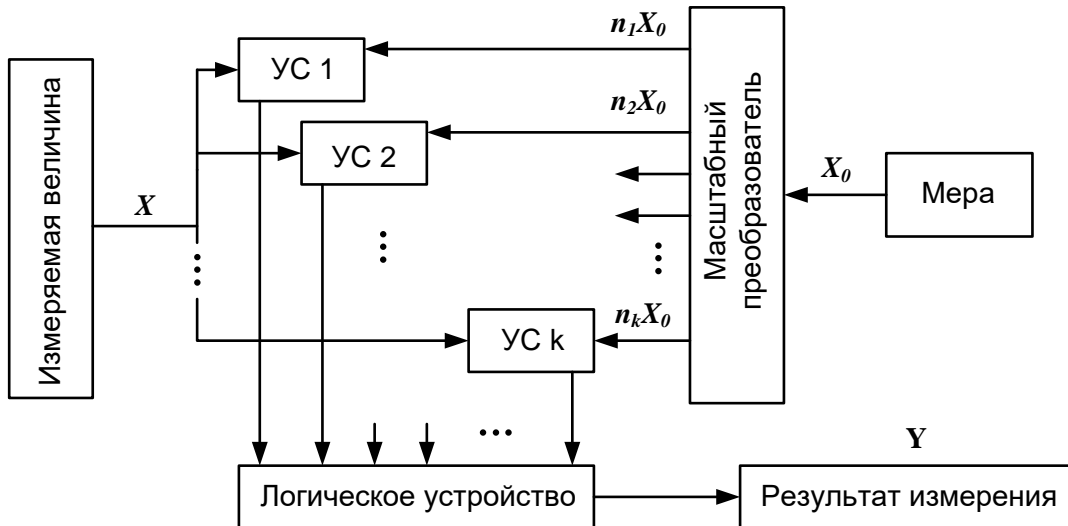
$$N_x \cdot \Delta x_{K1} = \Delta x + N_x \cdot \Delta x_{K2}, \text{ откуда}$$

$$\Delta x = N_x (\Delta x_{K1} - \Delta x_{K2}) = N_x (\Delta x_{K1} - 0,9 \cdot \Delta x_{K1}) = N_x \cdot 0,1 \Delta x_{K1}.$$



**Рис. 5.9. Нониусный метод**

Примером измерения методом совпадения может служить измерение длины детали с помощью штангенциркуля с нониусом, другим примером – измерение частоты вращения детали с помощью мигающей лампы стробоскопа: наблюдая положение метки на вращающейся детали в моменты вспышек лампы, по частоте вспышек и смещению метки определяют частоту вращения детали. Метод "нониуса" находит также широкое применение при измерении временных интервалов двух близких частот (биений) и в других случаях.



**Рис. 5.10. Метод совпадения с масштабным преобразованием известной величины (УС - устройство сравнения)**

Функциональная схема прибора, работающего по методу совпадений с масштабным преобразованием только величины, воспроизводимой мерой, показана на рис.5.10. Здесь величина  $X_0$  однозначной меры подвергается масштабному преобразованию для выработки величин  $n_1 X_0$ ,  $n_2 X_0$ , ...,  $n_j X_0$ , ...,  $n_k X_0$ . Эти величины подаются на  $k$ -устройство сравнения, к ним же прикладывается и измеряемая величина  $X$ . Логическое устройство указывает номер устройства сравнения, у которого  $X - n_j X_0 = \min$  и определяет измеряемую величину на основе приближенного соотношения  $X = n_j X_0$ . Этот вариант метода совпадений нашел применение в цифровых приборах, измеряющих угловые и линейные перемещения.

Метод совпадения требует наличия многозначных мер или масштабных преобразователей величины и величины, воспроизводимой мерой. Поэтому в измерительной технике он используется сравнительно редко.

Очевидно, что выбор вида и метода измерений зависит от его теоретической обоснованности, наличия необходимых средств измерений, их вида (мера, измерительный прибор и др.) и конструктивных особенностей.

Например, чтобы решить такую простейшую измерительную задачу, как измерение высоты заводской трубы, можно выбрать один из следующих путей:

- поднявшись с рулеткой на трубу, произвести измерение (метод сравнения с мерой);
- подняться с высотомером до уровня трубы и измерить высоту подъема (метод непосредственной оценки);
- вычислить высоту трубы как катет прямоугольного треугольника на основании результатов измерений расстояния до трубы и угла этого треугольника (косвенные измерения).

Рассмотренные выше методы определяют принципы построения измерительных приборов. Их не следует путать с методикой измерения и алгоритмом измерения.

**Методика измерений** – детально намеченный порядок процесса измерений, регламентирующий методы, средства, алгоритмы выполнения измерений, которые в определенных (нормированных) условиях обеспечивают измерения с заданной точностью. Измерения должны осуществляться в соответствии с аттестованными в установленном порядке методиками. Порядок разработки и аттестации методик выполнения измерений определяется Федеральной службой по техническому регулированию и метрологии РФ.

**Алгоритм измерения** - точное предписание о выполнении в определенном порядке совокупности операций, обеспечивающих измерение значения физической величины.