

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Принципы измерений.
2. Виды измерений.
3. Методы измерений.

1. Принципы измерений.

Из уравнения измерения следует, что в основе любого измерения лежит **сравнение** исследуемой физической величины с аналогичной величиной определенного размера, принятой за единицу. Суть измерения состоит в определении числового значения физической величины. Этот процесс называют измерительным преобразованием, подчеркивая связь измеряемой физической величины с полученным числом. Можно представить однократное преобразование или цепочку преобразований измеряемой физической величины в иную величину, но конечной целью преобразования является получение числа (рисунок 1). Более строго это можно представить как получение информации о физической величине и такое ее преобразование, с помощью которого определяют соотношение измеряемой физической величины и единицы этой величины.

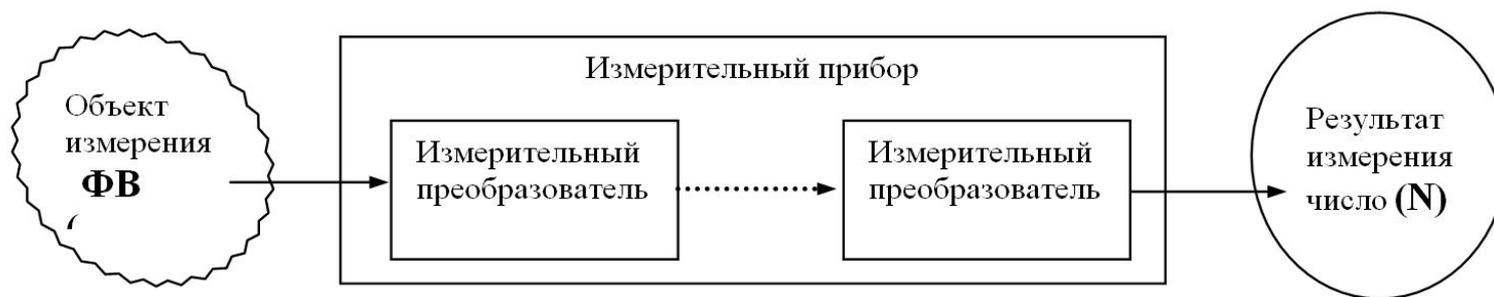


Рис. 1. Измерение как преобразование измеряемой физической величины в число

Принцип измерений – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений (РМГ 29 -99).

Например, измерение температуры с помощью термопары (использование термоэлектрического эффекта); измерение массы взвешиванием на пружинных весах (определение силы тяжести, которая пропорциональна искомой массе, основано на принципе пропорционального упругого растяжения) и др.

Поскольку принципы измерений связаны с измерительными преобразованиями, то можно говорить о средствах измерений, построенных на определенных принципах преобразования измерительной информации: механических, оптических, электрических, пневматических, гидравлических, магнитных и других, в том числе и комбинированных. Фактически принципы измерений определяются принципами, заложенными в использованных средств измерений.

Рассмотрим некоторые типичные принципы и отдельные физические явления, позволяющие преобразовать измеряемые неэлектрические величины в электрические:

- **термоэлектрический эффект** применяется для измерения температуры и имеет два способа реализации:

- 1) нагревание электрических проводников и полупроводников вызывает изменение их сопротивления. Соответствующие преобразователи называются терморезисторами или термисторами. С увеличением температуры сопротивление термистора уменьшается, а у терморезистора – возрастает. Чувствительные элементы полупроводникового преобразователя изготавливаются из окислов различных металлов. Одни материалы (например, платина) позволяют получить высокую точность измерения температуры, другие материалы (особенно полупроводники) дают возможность измерять очень малые интервалы температур и температуру тел очень малого объема. На этом принципе работают термометры сопротивления.
- 2) возникновение термоЭДС в замкнутом контуре, состоящем из двух полупроводников (или проводников), спаянных между собой на одном конце, а на другом подключенных к измерителю ЭДС, при различии температуры в месте спая и в месте соединения с измерителем. Такие преобразователи называются термопарами.

- **пьезоэлектрический эффект** заключается в возникновении ЭДС на поверхности (гранях) некоторых кристаллов (кварц, турмалин, искусственные материалы - пьезокерамика), когда к двум граням приложена сила, сдавливающая или растягивающая их. Это явление обратимо, т.е., когда к двум граням приложено напряжение, кристалл деформируется. Пьезоэлектрический эффект, практически безинерционный, получил широкое и разнообразное применение. Он используется для измерения давления, вибрации, частоты электрических колебаний. Особое значение этот эффект имеет для стабилизации частоты высокочастотных генераторов. Для этой цели применяются, как правило, кристаллы кварца;
- **фотоэлектрический эффект** основан на преобразовании световой энергии в электрическую. Для целей измерений используются внешний и внутренний фотоэффекты. Внешний фотоэффект возникает в вакуумированном баллоне, имеющем анод и фотокатод. При освещении фотокатода в нем под влиянием фотонов света эмиттируются электроны. В случае наличия между анодом и фотокатодом электрического напряжения эмиттируемые фотокатодом электроны образуют электрический ток, называемый фототоком. Описанный преобразователь называется фотоэлементом.

Внутренний фотоэффект возникает при освещении слоя между некоторыми полупроводниками и металлами. В этом слое возбуждается ЭДС. У ряда полупроводников под влиянием светового излучения изменяется электрическое сопротивление. Иногда этот эффект называется фоторезистивным, а соответствующие устройства — фоторезисторами. «Темновое» (при отсутствии освещения) сопротивление фоторезистора достаточно большое (например, 10^8 Ом). При освещении оно может уменьшиться до 10^5 Ом. Фоторезисторы обладают высокой чувствительностью, существенно превышающей чувствительность фотоэлементов. В качестве фоточувствительного материала применяют сернистый кадмий, сернистый свинец, кремний и др.

– растяжение или сжатие некоторых металлов в пределах их упругости вызывает изменение их электрического сопротивления. Это явление дает возможность изготавливать электротензометры и измерять малые деформации тел и усилия в условиях, при которых измерение другими методами невозможно, например, деформации различных частей машин во время их работы. Это явление позволяет также измерять высокие и сверхвысокие давления (манганиновый манометр);

- магнитная проницаемость тел из ферромагнитных материалов изменяется в зависимости от приложенных к ним механических сил (растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих). Наблюдается и обратное явление: в ферромагнитном теле при внесении его в магнитное поле возникают механические деформации. Эти явления получили название **магнитострикции**. Магнитное поле, изменяющееся при механическом воздействии, измеряется при помощи катушки, обмотка которой помещается на ферромагнитном сердечнике. Магнитострикционные преобразователи применяются главным образом в технике измерения звуковых и ультразвуковых колебаний;
- зависимость яркости свечения тела от температуры, которая в свою очередь зависит от силы тока, накаливающего нити, позволяет измерять температуру бесконтактным методом, например, при помощи оптического пирометра;
- электрическая емкость плоского конденсатора выражается формулой $C = \epsilon \cdot S/d$ где C - емкость конденсатора; ϵ - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, находящегося между обкладками; S - площадь его обкладок; d - расстояние между обкладками. Изменение электрической емкости используют для измерения малых размеров и малых перемещений;
 - перемещение измеряют также по изменению индуктивности катушки с сердечником из магнитомягкого материала. Изменение воздушного зазора в сердечнике вызывает изменение индуктивного сопротивления катушки, которое определяют тем или иным электрическим методом.

2. Виды измерений.

РМГ 29 –99 вводит понятие **область измерений** – совокупность измерений физических величин, свойственных какой-либо области науки или техники и выделяющихся своей спецификой. В соответствии с определением выделяют ряд областей измерений: механические измерения, магнитные, акустические, измерения ионизирующих излучений и др.

Видом измерений названа часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин. Как примеры видов измерений приведены измерения электрического сопротивления, электродвижущей силы, электрического напряжения, магнитной индукции, относящиеся к области электрических и магнитных измерений.

Более широкая трактовка видов измерений (с использованием различных оснований классификации):

- в зависимости от способа получения результата измерений: **прямые и косвенные измерения; совокупные и совместные измерения,**

- по используемым размерам единиц: **абсолютные и относительные измерения,**
- по числу измерений: **однократные и многократные измерения,**
- по характеру изменения величины во времени: **статические и динамические измерения,**
- по точности: **равноточные и неравноточные измерения; равнорассеянные и неравнорассеянные.**
- по используемым размерам единиц: **абсолютные и относительные измерения,**
- по числу измерений: **однократные и многократные измерения,**
- по характеру изменения величины во времени: **статические и динамические измерения,**
- по точности: **равноточные и неравноточные измерения; равнорассеянные и неравнорассеянные**

Косвенное измерение – определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной.

При косвенных измерениях искомое значение величины рассчитывают на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Формальная запись такого измерения

$$Q = F(X, Y, Z, \dots),$$

где X, Y, Z, \dots – результаты прямых измерений.

Принципиальной особенностью косвенных измерений является необходимость **обработки (преобразования) результатов вне прибора** (на бумаге, с помощью калькулятора или компьютера), в противоположность прямым измерениям, при которых прибор выдает готовый результат.

Классическими примерами косвенных измерений можно считать нахождение значения угла треугольника по измеренным длинам сторон, определение площади треугольника или другой геометрической фигуры и т.п. Один из наиболее часто встречающихся случаев применения косвенных измерений – определение плотности материала твердого тела. Например, плотность ρ тела цилиндрической формы определяют по результатам прямых измерений массы m , высоты h и диаметра цилиндра d , связанных с плотностью уравнением

$$\rho = m / 0,25\pi d^2 h$$

Прямые и косвенные измерения характеризуют измерения некоторой конкретной одиночной физической величины. Измерение любого **множества** физических величин классифицируется в соответствии с однородностью (или неоднородностью) измеряемых величин. На этом и построено различие совокупных и совместных измерений.

Совокупные измерения – проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях.

Примеры

1. Классический пример – калибровка набора гирь по одной эталонной гире. Определение значений массы отдельных гирь набора Г-1-110 по известному значению массы эталонной гири 1 кг по результатам измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь (для поверки набора гирь Г нужно составить 13 уравнений). Набор состоит из гирь массой 500, 200, 200*, 100, 50, 20, 20*, 10, 5, 2, 2* и 1 г. Сначала методом точного взвешивания на весах повышенной точности сличают гирю 1 кг (1000 г) с гирями набора 500, 200, 200*, 100 и получают уравнение:

$$1000 - (500 + 200 + 200^* + 100) = a_1.$$

Затем гирю 500 г набора сличают с массой гирь 200, 200*, 100 и получают уравнение:

$$500 - (200 + 200^* + 100) = a_2.$$

Аналогично проводят другие сличения и получают 13 уравнений с 13 неизвестными. Решив систему уравнений получают действительные значения масс гирь набора.

2. Метод измерения взаимной индуктивности между двумя катушками. Имеются 2 катушки с индуктивностью L_1 и L_2 . Для получения искомого результата сначала соединяют катушки так, чтобы их магнитные поля складывались, при этом общая индуктивность $L_{o1} = L_1 + L_2 + 2M$, где M – взаимная индуктивность между катушками. Затем магнитные катушки соединяются так, чтобы их магнитные поля вычитались. В этом случае общая индуктивность $L_{o2} = L_1 + L_2 - 2M$. Значения L_{o1} и L_{o2} получают с помощью прямых измерений. Решение уравнений для L_{o1} и L_{o2} позволяет найти искомую однородную величину M , измеряемую в генри $M = (L_{o1} - L_{o2})/4$.

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

Совместные измерения подразумевают измерение нескольких неоднородных величин (X, Y, Z и т.д.).

В качестве примера можно рассмотреть одновременные измерения длин и температур для нахождения температурного коэффициента линейного расширения. Так же определяют коэффициенты в формуле, связывающей сопротивление резистора с его температурой.

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2]$$

где R_t – сопротивление резистора при температуре t °С; R_{20} – сопротивление резистора при температуре 20°С; α , β и R_{20} – искомые величины.

Измеряя сопротивление резистора при различных температурах (t_1, t_2, t_3), определяемых по термометру, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} R_t^I = R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2]; \\ R_t^{II} = R_{20} [1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2]; \\ R_t^{III} = R_{20} [1 + \alpha(t_3 - 20) + \beta(t_3 - 20)^2]. \end{cases}$$

Решая эту систему найдем α , β и R_{20} .

Для отображения результатов, получаемых при измерениях, могут быть использованы разные оценочные шкалы, в том числе градуированные в единицах измеряемой физической величины, либо в некоторых относительных единицах, в том числе и в неименованных. В соответствии с этим принято различать **абсолютные** и **относительные** измерения.

Относительное измерение – измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы.

Например, определение активности радионуклида в источнике посредством измерения ее отношения к активности радионуклида в другом источнике, аттестованном в качестве эталонной меры этой величины.

Абсолютное измерение – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использований фундаментальных физических констант.

Измерение энергии по формуле $E=mc^2$ является абсолютным измерением. А, например, измерение силы с помощью динамометра будет относительным измерением, но ее измерение путем использования ускорения всемирного тяготения и мер массы – абсолютным.

По числу повторных измерений одной и той же величины различают **однократные** и **многократные** измерения.

Однократное измерение – измерение, выполненное один раз.

Многократное измерение – измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т. е. состоящее из ряда однократных измерений.

Считают, что измерение выполненное более 4 раз можно назвать многократным, с этого числа начинаются таблицы статистических распределений и ряд наблюдений может быть обработан по правилам математической статистики. В зависимости от поставленной цели число повторных измерений может колебаться в широких пределах (от двух измерений до нескольких десятков и даже сотен). Многократные измерения проводят или для страховки от грубых погрешностей (в таком случае достаточно трех-пяти измерений) или для последующей математической обработки результатов (часто более пятнадцати измерений с последующими расчетами средних значений, статистической оценкой отклонений и др.).

По характеру изменения измеряемой величины различают:

Статическое измерение – измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

Динамическое измерение – измерение изменяющейся по размеру физической величины.

По реализованной точности и по степени рассеяния результатов при многократном повторении измерений одной и той же величины различают равноточные и неравноточные, а также на равномерные и неравномерные измерения.

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

Неравноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Методы обработки этих видов измерений отличаются, поэтому равноточность измерений статистически проверяют по критерию Фишера, а неравноточные измерения обрабатывают с учетом веса отдельных измерений, входящих в ряд.

Оценка равноточности и неравноточности, а также равнорассеянности и неравнорассеянности результатов измерений зависит от выбранных значений предельных мер расхождения точности или оценок рассеяния. Допустимые расхождения оценок устанавливаются в зависимости от задачи измерения. **Равноточными** называют серии измерений 1 и 2, для которых оценки погрешностей можно считать практически одинаковыми

$$(\Delta_1 \approx \Delta_2),$$

а к **неравноточным** относят измерения с различающимися погрешностями

$$(\Delta_1 \neq \Delta_2).$$

Измерения в двух сериях считают **равнорассеянными** ($\Delta_1 \approx \Delta_2$), или при ($\Delta_1 \neq \Delta_2$) **неравнорассеянными** в зависимости от совпадения или различия оценок случайных составляющих погрешностей измерений сравниваемых серий 1 и 2.

В зависимости от планируемой точности измерения делят на **технические** и **метрологические**. К **техническим** следует относить те измерения, которые выполняют с заранее установленной точностью. **Метрологические измерения** выполняют с максимально достижимой точностью, добиваясь минимальной (при имеющихся ограничениях) погрешности измерения Δ .

Такие измерения имеют место при эталонировании единиц, при выполнении уникальных исследований.

3. Методы измерений

В соответствии с РМГ 29 -99 *метод измерений* – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Классификация методов измерений может осуществляться по разным основаниям. Например:

- 1) в зависимости от используемого физического принципа: электрические, магнитные, механические, оптические и т.д.,
- 2) в зависимости от режима изменения во времени измерительного сигнала: статические и динамические;
- 3) в зависимости от способа взаимодействия СИ и объекта измерений: контактные и бесконтактные;

Контактный метод измерений (контактный метод) – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения. Примеры: измерение диаметра вала индикаторной скобой, измерение температуры тела термометром.

Бесконтактный метод измерений (бесконтактный метод) – метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент средства измерений не приводится в контакт с объектом измерения. Примерами могут быть измерение температуры в доменной печи пирометром и измерение расстояния до объекта радиолокатором.

4) в зависимости от применяемого в СИ измерительного сигнала: аналоговые и цифровые;

5) по способу сравнения измеряемой величины с единицей: метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой и его разновидности.

Последний признак является наиболее соответствующим приведенным определениям метода измерений. Его и рассмотрим детально.

Анализ метода измерений следует начинать с выяснения основных признаков: является он **методом непосредственной оценки** или **методом сравнения с мерой**. Фактически это единственное принципиальное деление, поскольку значительная часть терминов просто уточняет разновидности метода сравнения с мерой.

Метод непосредственной оценки – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений. Например, взвешивание на электронных весах, определение размера микрометром, давление пружинным манометром. Измерения проводятся быстро, легко, не требуют высокой квалификации оператора.

Суть метода непосредственной оценки, как любого метода измерения состоит в сравнении измеряемой величины с мерой, принятой за единицу, но в этом случае мера "заложена" в измерительный прибор **опосредованно**.

Формальное выражение для описания метода непосредственной оценки может быть представлено в следующей форме:

$$Q = x,$$

где Q – измеряемая величина,

x – показания средства измерения.

Метод сравнения с мерой (метод сравнения) – метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

В этом случае прибор используют для сопоставления измеряемой величины с известной величиной, воспроизводимой мерой. Для реализации этого метода можно использовать приборы с относительно небольшими диапазонами показаний, вплоть до вырожденной шкалы с одной нулевой отметкой.

Примерами этого метода являются измерения массы на рычажных весах с уравниванием объекта гири (мерами массы), измерения напряжения постоянного тока прибором-компенсатором путем сравнения с известной ЭДС нормального элемента.

Формально метод сравнения с мерой может быть описан следующим выражением:

$$Q = x + X_m,$$

где Q – измеряемая величина,

x – показания средства измерения.

X_m – величина, воспроизводимая мерой.

Примерами используемых мер являются гири, концевые меры длины или угла, эталонные резисторы и т.д.

Метод сравнения с мерой (в отличие от метода непосредственной оценки) предусматривает **обязательное использование овеществленной меры**. Меры в явном виде воспроизводят с выбранной точностью физическую величину определенного (близкого к измеряемой) размера.

Метод сравнения с мерой реализуется в нескольких разновидностях, среди которых различают:

- **дифференциальный метод;**
- **нулевой метод;**
- **метод замещения;**
- **метод противопоставления;**
- **метод совпадений.**

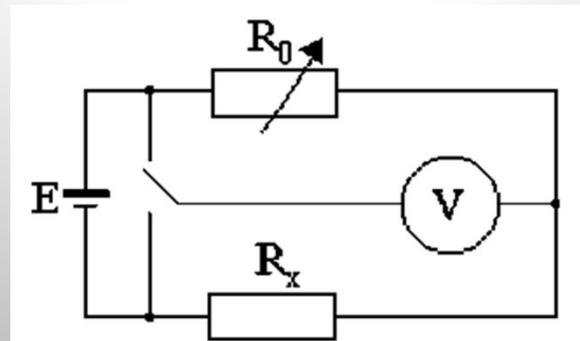
В зависимости от степени приближения размера, воспроизводимого мерой, к измеряемой величине различают **дифференциальный и нулевой методы**.

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.

Метод реализуется в тех случаях, когда точно и просто реализуется операция вычитания величин (длины, перемещения, электрического напряжения, э.д.с.). Не применяется для температуры или твердости.

Пример

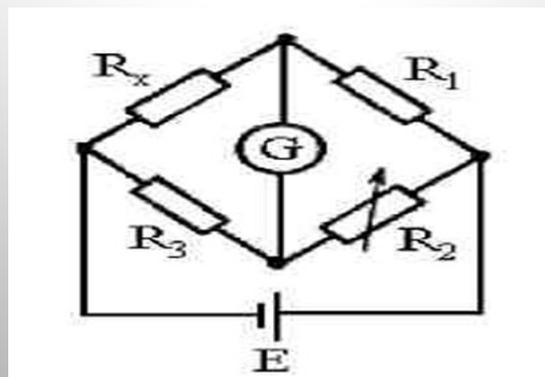
1. Измерения длины, выполняемые на станковом приборе с измерительной головкой при настройке по блоку концевых мер.
2. Измерение сопротивления дифференциальным методом. Вольтметр V включается с помощью переключателя Π в цепь с измеряемым сопротивлением R_x или в цепь с регулируемым потенциометром (мерой) R_o . При достижении одинаковых показаний вольтметра ($R_x = R_o$) регистрируется искомое значение R_x .



Нулевой метод измерений (можно сказать частный случай дифференциального метода) – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля.

Пример

1. Измерения массы взвешиванием на равноплечих рычажных весах с полным уравновешиванием чашек.
2. Измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравновешиванием. Мостовая схема оказывается полностью уравновешенной (гальванометр G показывает нуль), когда выполняется следующее условие: $R_x R_2 = R_1 R_3$. Таким образом, при полном уравновешивании искомая величина равна: $R_x = R_1 R_3 / R_2$



В зависимости от одновременности или неодновременности воздействия на прибор сравнения измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой, различают метод замещения и метод противопоставления.

***Метод измерений замещением (метод замещения)** – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины.*

Примеры.

1. Взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов (метод Борда).
2. Измерение размера детали с помощью рычажного микрометра следующим образом (в отличие от метода непосредственной оценки): подбирается блок концевых мер, размер которого близок к номиналу измеряемой детали. По блоку с помощью микрометрического винта настраивают микрометр, в результате чего стрелка рычажной системы устанавливается против нулевой отметки шкалы. Затем при этой настройке снимают блок мер и в размерную цепь микрометра включают измеряемую деталь. Результат измерения представляет сумму размера блока концевых мер и разности размеров блока и детали, которая определяется по отклонению стрелки рычажной системы от нулевого положения.
3. Применяется при электрических измерениях с помощью мостов переменного тока.

Преимущество метода заключается в том, что эти величины воздействуют на прибор **последовательно**.

Метод противопоставления – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, **одновременно** воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливают соотношение между этими величинами.

Пример – взвешивание груза на равноплечих весах, когда измеряемая масса определяется как сумма массы гирь, ее уравнивающих, и показания по шкале весов.

Метод совпадений – метод сравнения с мерой, при котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

Для оценки совпадения можно использовать прибор сравнения или органолептику, фиксируя появление определенного физического эффекта.

Например, по принципу метода совпадений построен нониус, входящий в состав ряда измерительных приборов. Стробоскопический эффект используется при измерении частоты вращения, совпадение резонансных частот - при приеме точных сигналов времени. В методе измерений частоты переменного тока с помощью осциллографа сравнивают фигуры Лиссажу, соответствующие искомой частоте и частоте меры, и по их совпадению определяют искомую частоту.

У всех разновидностей методов сравнения с мерой обязательно присутствуют не только погрешности приборов, но и погрешности мер, причем механизмы их проявления несколько различаются в соответствии с разновидностью метода. Выбор метода измерений зависит от его теоретической обоснованности, наличия необходимых СИ, их вида и конструктивных особенностей.

Для оценки метода измерений предлагается ответить на следующие вопросы:

- *применяется ли мера для воспроизведения физической величины в явном виде?*
- *измеряются ли значения отклонений физической величины от известного значения меры?*

Отрицательный ответ на первый вопрос означает, что мы имеем дело с методом непосредственной оценки. Положительный ответ на этот вопрос позволяет утверждать, что применяется метод сравнения с мерой. Если при этом значение разности измеряемой величины и меры доводится до нуля, реализуется нулевой метод измерений, а если разность этих значений алгебраически суммируется со значением меры – дифференциальный метод.

Если в ходе измерения мера и измеряемый объект последовательно воздействуют на вход средства измерений (СИ), "замещая" друг друга, реализуется метод замещения. Например, измерительная головка на стойке настраивается по плоскопараллельной концевой мере длины, после чего мера убирается и замещается контролируемой деталью.

Некоторые приборы (весы, измерительные мосты и др.) обеспечивают возможность одновременного воздействия на них меры и измеряемой физической величины. С помощью таких приборов реализуется метод противопоставления.