

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

Г. В. Шувалов, Г. В. Симонова, Н. А. Вихарева

# **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ**

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия для обучающихся  
по направлению подготовки  
27.03.01 Стандартизация и метрология (уровень бакалавриата)

Новосибирск  
СГУГиТ  
2022

УДК 535.8:004  
Ш952

Рецензенты: кандидат технических наук, научный сотрудник Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН *А. Ф. Бродников*  
кандидат технических наук, доцент СГУГиТ *В. М. Тиссен*

**Шувалов, Г. В.**

Ш952      Методы и средства измерений и контроля : учебное пособие /  
Г. В. Шувалов, Г. В. Симонова, Н. А. Вихарева. – Новосибирск :  
СГУГиТ, 2022. – 54 с. – Текст : непосредственный.  
ISBN 978-5-907513-62-4

Учебное пособие подготовлено доцентами, кандидатами технических наук Г. В. Симоновой, Н. А. Вихаревой и кандидатом технических наук Г. В. Шуваловым на кафедре специальных устройств, инноватики и метрологии СГУГиТ.

Рассматриваются теоретические положения и практические рекомендации для выбора средств и методов измерений при организации измерительного эксперимента по дисциплине «Методы и средства измерений и контроля». Приводятся контрольные вопросы для проверки качества освоения материала обучающимися.

Учебное пособие по дисциплине «Методы и средства измерений и контроля» предназначено для обучающихся по направлению подготовки 27.03.01 Стандартизация и метрология (уровень бакалавриата). Рекомендовано к изданию кафедрой специальных устройств, инноватики и метрологии, Ученым советом Института оптики и технологий информационной безопасности СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 535.8:004

ISBN 978-5-907513-62-4

© СГУГиТ, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение .....                                                                     | 4  |
| 1. Многообразие измерительных задач и классификация измерений<br>по их видам ..... | 5  |
| 1.1. Основы измерений .....                                                        | 5  |
| 1.2. Классификация измерений .....                                                 | 16 |
| 1.3. Вопросы для самоподготовки .....                                              | 22 |
| 2. Методы измерений .....                                                          | 23 |
| 2.1. Принципы классификации методов измерений .....                                | 23 |
| 2.2. Сравнительный анализ методов сравнения с мерой .....                          | 28 |
| 2.3. Вопросы для самоподготовки .....                                              | 34 |
| 3. Средства измерений .....                                                        | 36 |
| Заключение .....                                                                   | 46 |
| Библиографический список .....                                                     | 47 |
| Приложение 1. Единицы измерений основных физических величин .....                  | 49 |
| Приложение 2. Методические составляющие погрешности измерений .....                | 51 |
| Приложение 3. Инструментальные составляющие погрешности изме-<br>рений .....       | 52 |
| Приложение 4. Субъективные погрешности измерений .....                             | 53 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

В учебном пособии рассмотрены основные правила и термины, используемые для описания основ процесса измерений, а также методов и средств для его реализации. Приводятся и обосновываются правила и соотношения, позволяющие количественно связать измеряемые параметры, принципы формирования и применения единиц физических величин при выполнении измерений, а также особенности основных методов и средств для проведения измерительного эксперимента. Освоение предложенного материала позволит обучающимся понимать сущность физического процесса при проведении измерений с целью выбора оптимальной методики измерений, номенклатуры измеряемых параметров и соответствующих средств измерений. В структуру пособия входит не только рассмотрение основных закономерностей связи параметров физических процессов и явлений, но и прикладные аспекты использования выявленных соотношений. Приводятся вопросы для самоподготовки.

Информация, изложенная в данном пособии, способствует формированию у обучающихся компетенций, позволяющих эффективно использовать для профессиональной деятельности теоретические положения и практические навыки описания методов и средств измерений в области организации метрологического обеспечения процесса измерений.

# 1. МНОГООБРАЗИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ И КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ИХ ВИДАМ

## 1.1. Основы измерений

При решении множества практических задач требуется количественная оценка свойств объекта, хотя далеко не всегда эта оценка относится к его физическим характеристикам. Таким образом, при разработке как методов измерений, так и средств измерений необходимо учитывать эти особенности описания предметов и веществ. Объективно при таком подходе возникает разделение на *физические величины* и *нефизические величины*. Принято считать, что определение «величины» впервые было сформулировано российским академиком Л. Эйлером в книге [1]. Оно приемлемо и для нашего времени: «...называется величиной все то, что способно увеличиваться или уменьшаться, или то, к чему можно нечто прибавить или от чего можно нечто отнять...» [1]. В настоящее время под величиной в области метрологии определяется некоторое число, характеризующее свойство объекта, полученное при определенных условиях. Такой подход предполагает некоторые правила, по которым данная количественная характеристика определяется. Следовательно, нужно выбрать некоторую величину такого же типа, как и определяемая, которая известна, и, приняв ее за единицу, сравнить с измеряемой. Получится число, которое является результатом сравнения исследуемой величины с величиной, принятой в качестве единицы. Понятно, что свойство измеряемой величины должно допускать количественное сравнение для различных объектов данного типа, поскольку не всегда свойство можно количественно определить (например, запах или цвет). Такой процесс получил название *измерение*.

В настоящее время понятие «измерение» расширило область своего применения и используется в таких нетрадиционных областях, как медицина, экономика, информатика и пр.

Для реализации процесса измерений необходимо иметь условие оценки, т. е. договориться и ввести такую величину, которую будем считать

мерой количественной оценки, принимая этот размер за единицу. Физическая величина допускает сравнение единицей и может измеряться, а нефизическая величина такого свойства не имеет, поскольку ее единицу нельзя воспроизвести и, следовательно, может только оцениваться. Отсюда вытекает разделение всех величин на измеряемые и неизменяемые.

Измерения сопровождают человека всю его жизнь, начиная с момента рождения, их можно наблюдать, а можно и выполнять. Например, измерение температуры, использование линейки, весов и т. д. Слово «измерение» привычно в обычной жизни и понимается как действие с помощью измерительных приборов, например, тонометра или спидометра. Диапазон применения измерений огромен и не заканчивается простыми бытовыми задачами. Для получения точных количественных характеристик разнообразного круга явлений используется сложная многокомпонентная техника и точнейшие методики.

Несмотря на многообразие измерительных процессов, существует общий признак для измерений, поскольку при каждом измерении проводится сравнение измеряемой физической величины с одноименной величиной, размер которой принят за единицу. В результате проведенного сравнения появляется число, которое показывает, сколько таких единиц соответствует измеряемой величине, т. е. результат измерения.

Результат сравнения осуществляется специальными техническими устройствами, различающимися как по принципам действия, так и по разнообразным конструктивным решениям, но все они решают одну и ту же задачу и называются *средства измерений*. Рассматриваемые технические устройства классифицируются по разным признакам в зависимости от их свойств. Множество разнообразных технических средств, предназначенных для выполнения измерений, определяется общим понятием *измерительная техника*.

Основой создания измерительной техники является наука об измерениях, получившая название *метрология* (*logos* – учение, понятие, а *metron* – мера). В область метрологии также входит создание и изучение различных методов и средств измерений, особенности их характеристик и условий эксплуатации. Конечный итог таких исследований направлен на достижения требуемой точности и достоверности полученных результатов, а также обеспечение их единства [2].

*Единством измерений* называется такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в установленных единицах, погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Необходимость такого условия обусловлена требованиями сопоставимости результатов измерений, возможностью их сравнения независимо от вида используемых средств измерений, места и времени их получения. Принцип единства измерений важен для регулирования технических связей как внутри страны, так и в международном сотрудничестве.

Обязательным компонентом обеспечения единства измерений является однозначность использования принятых определений, понятий и терминов.

Особенность свойств любого физического объекта отображается в понятии «физическая величина». Это свойство в качественном отношении общее для множества однородных физических объектов, но индивидуальность каждого объекта выражается количественной характеристикой выбранной физической величины, т. е. этого свойства. Индивидуальность рассматриваемого свойства в данном случае проявляется через количественное соотношение свойства сравниваемых объектов.

Выявленная количественная индивидуальность физической величины для данного материального объекта называется *размер физической величины*. Введенное понятие «размер» отображает объективные количественные различия между физическими объектами по сравниваемому свойству.

При выполнении процесса измерений происходит сопоставление по размерам однородных свойств предметов. В результате сравнения получается некоторая оценка результата сопоставления. В зависимости от выбранного свойства это может быть, например, короче или длиннее, холоднее или теплее и т. д. У подобных заключений есть общий критерий направления счета «больше – меньше». На основании возможности ранжирования физических величин по заданному признаку выявляется фундаментальный признак реализуемости любого измерения.

Физические величины, которые можно сравнить по одному и тому же признаку «больше – меньше», называются *однородными*. Последовательный ряд, составленный из разных размеров однородных физических вели-

чин, составляет ряд, где каждый размер величины больше размера всех предыдущих и меньше размера последующих величин. Процесс сравнения показывает, что при измерении свойства физической величины нужно учитывать ее качественное и количественное свойство.

Обозначение вида физической величины отображается в указании ее свойств. Такое отображение получило название *размерность*. Для описания размерности данной величины используются установленные характеристики основных физических величин с указанием символа  $\dim$ , например

$$\dim l = L \text{ для длины;}$$

$$\dim m = M \text{ для массы;}$$

$$\dim t = T \text{ для времени.}$$

Для производных физических величин размерность выражается через установленные размерности основных величин с помощью степенного многочлена

$$\dim X = L^j M^r T^f,$$

где  $T, M, L$  – размерности основных физических величин;

$j, f, r$  – показатели размерности, которые могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

В результате различных соотношений размерных величин может получиться безразмерная величина, если используется отношение одноименных физических величин. Тогда показатели размерности в соотношении будут равны нулю (например, относительная магнитная проницаемость).

Для характеристики количественных свойств объекта значений физической величины вводится понятие *истинное значение* и *действительное значение*. Появление этих терминов обусловлено неоднозначностью результата измерений, поскольку невозможно гарантировать отсутствие дополнительных воздействий, влияющих на результат измерения. В табл. 1 приведен сравнительный анализ этих понятий.



## Сравнительный анализ понятий

| Термин                                      | Определение                                                                                                                              | Условие получения         |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Значение физической величины                | Размер определяемой физической величины в виде некоторого количества принятых для этой величины единиц                                   | Получено теоретически     |
| Истинное значение физической величины       | Идеальным образом отображенное свойство объекта как количественно, так и качественно (какое-то значение принимается за истинное условно) | Измерить невозможно       |
| Действительное значение физической величины | Значение, близкое к истинному значению и найденное экспериментально, поэтому используется вместо него                                    | Получено экспериментально |

Действительные величины необходимы для практической реализации измерений и определяются с заданной точностью. Полученное значение принимают за его истинную величину, хотя истинное и действительные значения близки, но не идентичны [3–5].

Любое измерение фактически отображает результат взаимодействия разных физических величин между собой. Количественно этот результат можно описать, только если ввести меру их взаимодействия между собой. Такой мерой должны стать некоторые однозначно определенные размеры этих величин, получившие название *единиц физических величин*.

Единицы, размеры которых были приняты в решениях Генеральных конференций по мерам и весам, получили название *основные единицы* и имеют следующие значения (прил. 1) [4].

Существуют еще две единицы, которых нет в таблице, но они имеют особые свойства, поскольку их значения однозначно определяются свойствами нашего пространства и получаются при перемещении радиуса вектора в заданном направлении.

*Радиян* определяется как плоский угол между двумя положениями радиуса окружности, при перемещении которого между этими положениями длина дуги равна радиусу  $R$  описываемой окружности.

Полный оборот вектора соответствует  $2\pi$  радиан. При таком определении одного из свойств нашего пространства проявляется количественная связь между размером вектора и длиной дуги описываемой концом вектора и поясняется соотношением (1)

$$\frac{2\pi R}{R} = 2\pi. \quad (1)$$

Соотношение этих размеров не зависит от их абсолютных значений. В градусном выражении радиан соответствует  $57^\circ 17' 44,8''$ .

***Стерadian** – это пространственная фигура с вершиной в центре сферы, вырезающая на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата, сторона которого равна радиусу сферы.*

Полный телесный угол соответствует  $4\pi_{\text{ср}}$ , соотношение (2). И в этом случае соотношение рассматриваемых величин не зависит от их количественных размеров.

$$\frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi. \quad (2)$$

Применяемая в настоящее время система, основанная на этих единицах и принятая по международному соглашению, обозначается как СИ и имеет некоторые особенности, поскольку в принятых единицах не учитываются релятивистские эффекты. Это ограничивает применимость введенных единиц небольшой пространственной областью, когда релятивистскими эффектами можно пренебречь, поэтому принятые единицы воспроизводятся в результате локальных экспериментов.

Воспроизведение единицы измерений для проведения измерений требует ее передачи средствам измерений, причем нужно передать именно эту единицу всем средствам для измерения данной физической величины. Такой подход необходим для обеспечения единства измерений, но технически представляет сложную задачу. Фактически происходит приведение размера единицы физической величины, хранимой данным средством измерения, к размеру единицы, хранимой и воспроизводимой эталоном. Процесс называется «поверка». Передача осуществляется путем сличения этих единиц,

при этом разработана многоступенчатая структура, получившая название *поверочная схема*. Государственные поверочные схемы заложены в государственные стандарты.

Для формирования отображения изменения размера физической величины создают некоторую последовательность изменения количественной характеристики величины, получившей название *шкала* (лат. *scalae* – лестница). Шкала состоит из последовательного натурального ряда физических величин различного размера, которые применяются в качестве исходных или реперных точек. Их совокупность образует шкалу размеров физической величины. Для получения количественных значений точек шкалы выбирают два размера,  $N_1$  и  $N_0$ , которые соответствуют легко определяемым состояниям физического объекта. Определение значения некоторого интервала изменений физической величины требует значение начала отсчета ее изменений  $N_0$  и конечного значения изменений  $N_1$ . Выбранные значения границ интервала называются *опорными точками (реперами)*. Делением основного интервала на заданное число участков  $n$  получают единицу физической величины

$$1[X] = \frac{N_1 - N_0}{n}, \quad (3)$$

где  $1[X]$  – размер физической величины, которому приписывают значение единицы данной физической величины.

Единица физической величины – это выбранный и нормативно закрепленный размер данного свойства. Полученный размер единицы применяется для сравнения с другими размерами этих однородных величин и позволяет получить результат измерения, который показывает сколько выбранных единичных размеров в измеряемых величинах находится.

На основании приведенного соотношения получается формула, называемая *основным уравнением измерения*

$$Y_i = x_i \cdot [X], \quad (4)$$

где  $Y_i$  – результат измерений;

$x_i$  – числовое значение измеряемой величины;

$[X]$  – единица измеряемой физической величины.

*Измерительное преобразование* – это действие, которое позволяет количественно связать разные физические величины посредством выражения размера одной физической величины через размер другой физической величины, по заданной функции преобразования. Для получения результата измерений физической величины необходим физический процесс, в котором проявится эта величина.

Значение физической величины определяется при реализации процесса сравнения этой величины с единицей. Сравнение осуществляется предназначенным для этого техническим устройством, которое хранит единицу этой величины и позволяет найти соотношение между этой единицей и исходной величиной. Такой процесс называется *измерением*, позволяющим получить *результат измерений*.

Объектом измерений служит некоторое физическое тело, которое можно охарактеризовать через набор его свойств – измеряемых физических величин.

Результатом измерений является размер физической величины в виде определенного числа принятых для ее измерения единиц.

Процесс измерения имеет некоторую обязательную этапность, элементы которой представлены на рис. 1. Последовательность этапов состоит из подготовки измерения, выбора средства измерений, проведение процесса измерений и обработку полученных результатов.

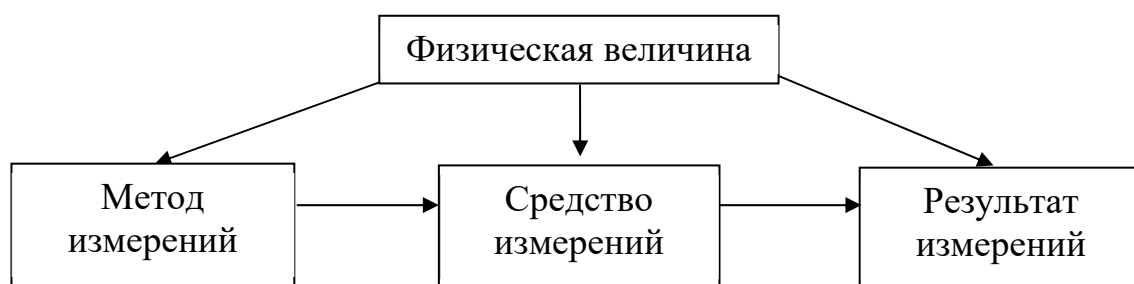


Рис. 1. Этапность измерений

Измерение происходит в результате взаимодействия средства измерений (СИ) и объекта измерений, по изменению состояния которого определяется мера воздействия в установленных единицах.

*Средство измерений* представляет собой устройство, предназначенное для данного вида измерений, обладающее известными характеристиками, получившими название *метрологических*, так как хранят и воспроизводят единицу физической величины для сравнения с измеряемой величиной. Размер используемой единицы физической величины принимают неизменным в течение времени измерений.

Числовое значение количества единиц физической величины в измеряемом размере будет результатом измерения. Если изменить размер единицы, то и числовое значение неизменного размера изменится, т. е. размер физической величины не изменяется, а изменяется число единиц, определяемое при сравнении.

Для понимания полученного числового значения величины необходимо использовать принятые термины *истинное и действительное* значения физической величины. Истинное значение физической величины существует независимо от измерений. А попытка отобразить этот размер приводит к результату измерений, что соответствует *действительному* значению физической величины. Значение полученной величины достаточно близко к ее истинному значению и может быть принято вместо него.

*Точность измерения* – отражает близость результата к истинному значению измеряемой величины. Результат измерений является реализацией при измерениях случайной величины с учетом истинного значения и возможной погрешности оценки. Поэтому при получении результата измерений собственно числового значения недостаточно, так как нужно оценить его близость к истинному значению. Без этой дополнительной информации результаты измерений несопоставимы ни друг с другом, ни со значениями, указанными в разнообразной технической документации, технических условиях, стандартах, с результатами, полученными другими авторами. Точность является основным понятием для описания качества измерений и результатов измерений.

Под точностью измерений понимают близость измеренного значения (результата измерения) к истинному значению измеряемой величины. При оценивании характеристик погрешности следует руководствоваться рекомендациями [3].

Отклонение результата измерения  $X$  от истинного значения  $X_{\text{и}}$  (действительного  $X_{\text{д}}$ ) измеряемой величины получил название абсолютной погрешности  $\Delta$ , которое определяется соотношением (5)

$$\Delta = X - X_{\text{и}}. \quad (5)$$

Погрешность  $\Delta$ , определяемая формулой (5), выражена в единицах измеряемой величины.

Для оценки значимости отклонения  $\Delta$  для достоверности результата измерений вводится понятие *относительной погрешности измерения*  $\delta$  – которое определяется формулой (6)

$$\delta = \frac{\Delta}{X_{\text{и}}}. \quad (6)$$

При проведении расчетов абсолютной и относительной погрешностей в силу отсутствия истинного значения физической величины  $X$  используется ее действительное значение  $X_{\text{д}}$ , являющее отображением истинного значения в виде результата измерений. На рис. 2 приведена схема взаимодействия и последовательности основных элементов процесса измерений.

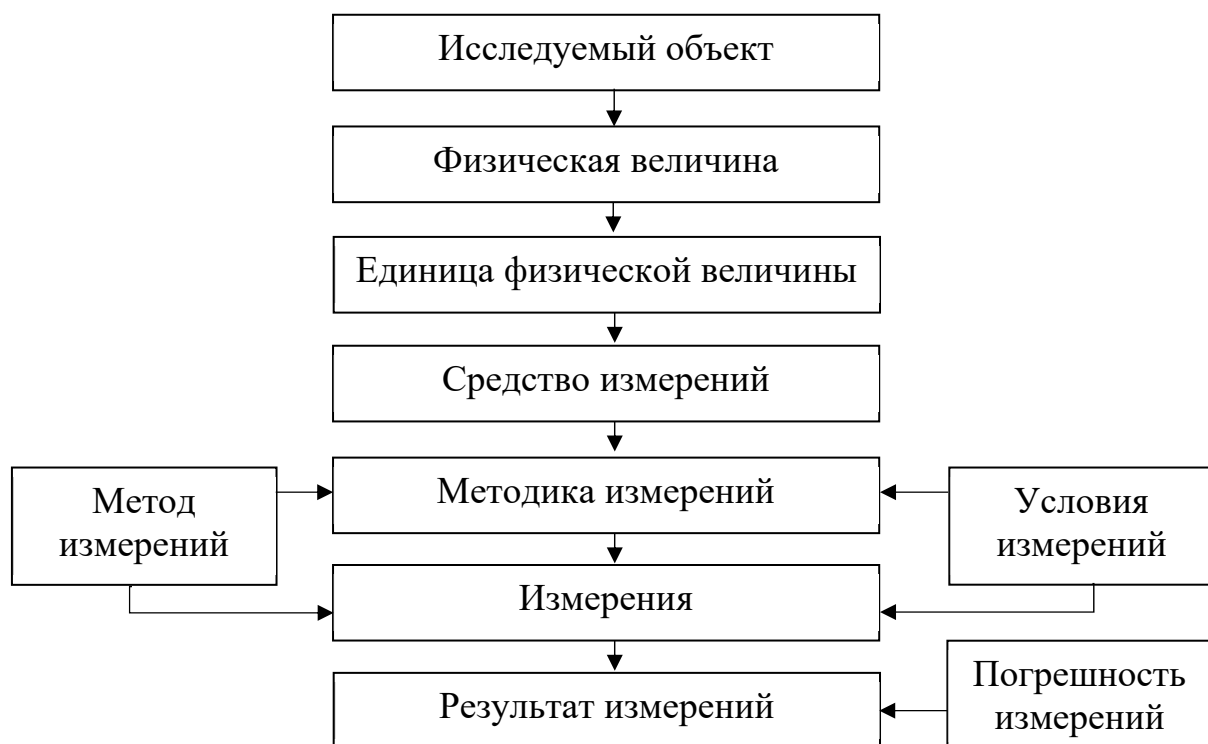


Рис. 2. Основные элементы процесса измерений

Конечный результат процесса, приведенного на схеме, отобразится в виде числового значения, но не совсем соответствующего реальному значению. Ошибку надо как-то оценить, и для этой задачи принято использовать такие характеристики, как доверительный интервал существования истинного значения, среднеквадратичное отклонение среднего значения и соотношение значений систематической и случайной составляющих погрешностей [4–6].

*Для оценки характеристик случайной составляющей погрешности измерений используют среднеквадратичное отклонение случайной составляющей погрешности измерений.*

*В качестве характеристик систематической составляющей погрешности измерений используют среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической погрешности измерений или границы, в которых неисключенная систематическая составляющая погрешности измерений находится с заданной вероятностью (в частности, с вероятностью, равной единице).*

Размер физической величины, полученный при измерении, называют *измерительной информацией*. Измерительная информация поступает от средства измерений в виде некоторого сигнала, который может быть зафиксирован наблюдателем или иными потребителями измерительной информации. Измерительный сигнал возникает в результате реакции средства измерений на воздействие измеряемой величиной и связан с измеряемой физической величиной посредством некоторой известной функции. Но кроме этого воздействия могут возникнуть и другие, обусловленные другими величинами. Эти величины, которые могут воздействовать на средство измерений при проведении измерений и вносить изменения в измерительную информацию, получили название *влияющие физические величины* (ВФВ).

Влияющими величинами могут быть разные внешние воздействия, например неточность градуировки, внешние электромагнитные поля и т. д., что приводит к появлению погрешности измерения.

***Принцип измерений** – это физическое явление или эффект, положенный в основу измерений.*

Для организации процесса измерений необходимо знать его основные характеристики (принцип измерений, метод измерений и погрешность, а иногда точность измерения).

## 1.2. Классификация измерений

В метрологии существует множество *видов измерений* и в настоящее время их классификация не стандартизована. На рис. 3 приведена общая структура классификации измерений по разным классификационным признакам.

По самому общему признаку все измерения делятся на *лабораторные (исследовательские)* и *технические*. Независимо от этого признака существуют и другие направления классификации, которые отображены на рис. 3. Классификация по каждому признаку имеет свои особенности и будет рассмотрена далее.



Рис. 3. Классификация измерений



Рассмотрим основные классификационные признаки измерений.

**Прямое измерение** – измерение, при котором искомое значение измеряемой величины получают путем сравнения измеряемой величины с мерой, в том числе путем отсчета по шкале, градуированной в единицах этой величины.

Результаты прямых измерений служат основой для других видов измерений.

**Косвенное измерение** – измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой искомой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

Таким образом, когда мы говорим о косвенных измерениях, мы всегда предполагаем наличие определенной зависимости между величиной  $y$ , значение которой хотим определить, и непосредственными результатами прямых измерений  $X_1, X_2, X_3, \dots$ .

Косвенные измерения позволяют значительно проще (в смысле создания технических средств, но не обработки результатов измерений), а в некоторых случаях и точнее определить значение некоторых физических величин. Следует отметить, что для некоторых величин осуществить прямые измерения невозможно (измерение оптической плотности тела или диэлектрической проницаемости вещества).

Результаты *совокупных* измерений определяют решением системы уравнений, составленных по результатам прямых измерений различных сочетаний однородных физических величин.

**Совместные** – измерения, при которых по результатам одновременных (прямых или косвенных) измерений неоднородных физических величин определяются зависимости между ними. Характерным примером совместных измерений является определение функций преобразования  $y = f(x)$  средств измерений, связывающих значения измеряемой величины  $x$  со значениями выходного сигнала  $y$ .

**Абсолютное** – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант [7]. Например, измерение силы  $F$  основано на измерении

основной величины массы  $m$  и использовании физической постоянной – ускорения свободного падения  $g$ .

*Относительное* – измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную [7].

По связи с объектом различают *бесконтактные* и *контактные* измерения. Пример бесконтактного измерения – измерения на оптических приборах.

*Равноточные* – измерения какой-то величины, выполненные одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях.

Измерения, полученные при использовании нескольких различных по точности средств измерений и (или) в разных условиях, называются *неравноточные*.

Таким образом, еще раз подчеркнем, что основу любых измерений составляют *прямые измерения* [8, 9].

***Методика измерений*** – это последовательность и совокупность однозначно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности. (Федеральный закон от 26.06.2008 № 102–ФЗ «Об обеспечении единства измерений»).

Методики выполнения измерений (МВИ) стали объектом деятельности метрологов с начала 1970-х гг. в период формирования Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ). Внимание к МВИ было обусловлено пониманием того, что точность многих измерений зависит не только от метрологических характеристик применяемых средств измерений, но и от метода, процедуры и условий измерения. В 1972 г. был разработан стандарт, установивший общие требования к стандартизации и аттестации МВИ. Опираясь на этот стандарт, органы государственной и ведомственных метрологических служб стали участвовать в разработке МВИ, выполняя их метрологическую экспертизу и/или аттестацию.

Начиная с 1993 г. МВИ подвергаются законодательному регулированию. В закон РФ «Об обеспечении единства измерений» включается статья

«Методики выполнения измерений», в которой указывается, что измерения должны осуществляться в соответствии с разработанными и аттестованными в установленном порядке методиками. В принятом в 2008 г. новом законе 102–ФЗ требование о проведении измерений по аттестованным методикам (методам) измерений было ограничено измерениями, на которые распространяется сфера государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Методики измерений сейчас стали предметом деятельности широкого круга метрологов. Одни из них устанавливают требования к методикам, другие непосредственно участвуют в их разработке, третьи оценивают соответствие разработанных методик установленным требованиям, четвертые осуществляют метрологический надзор за наличием и соблюдением требований методик. Активное участие в этой деятельности (главным образом в форме аттестации методик) принимают сотрудники и предприятия системы ГСИ. Наибольшее количество аттестованных методик относится к трем видам измерений: физико-химическим (более 7 тыс.); электрическим и магнитным (более 5 тыс.); расхода, вместимости, уровня и параметров потока (более 5 тыс.).

Основные положения, регламентирующие вопросы разработки, аттестации и применения излагаются в национальном стандарте ГОСТ Р 8.563–2009 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики (методы) измерений» [3].

В данном стандарте приведено несколько определений, относящихся к разработке и аттестации методик.

*Аттестация методик измерений состоит в подтверждении соответствия методик измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям.*

*Метрологическая экспертиза методик измерений* включает оценку выбора методов и средств измерений, операций и правил проведения измерений, а также обработки их результатов в целях установления соответствия методики измерений предъявляемым к ней метрологическим требованиям. В качестве показателя точности методики измерений могут быть использованы характеристики, предлагаемые в [3, 5].

Разработку методик измерений осуществляют на основе исходных данных, которые могут быть приведены в техническом задании, технических условиях и других документах.

К исходным данным относится следующее:

- область применения (объект измерений, в том числе наименование продукции и контролируемых параметров, а также область использования для одного предприятия, для сети лабораторий и т. п.);

- если методика измерений может быть использована для оценки соответствия требованиям, установленным техническим регламентом, то в документе на методику измерений указывают наименование технического регламента, номер пункта, устанавливающего требования (при необходимости и наименование национального стандарта или свода правил), а также указывают, войдет ли документ, в котором изложена методика измерений, в нормативные документы.

Требования к точности измерений приводят путем задания показателей точности и ссылки на документы, в которых эти значения установлены, что указывается при описании требований к выражению погрешности и неопределенности измерений, выполненных с использованием теории шкал.

Методы и средства измерений выбирают в соответствии с документами, относящимися к выбору методов и средств измерений данного вида, а при отсутствии таких документов – в соответствии с общими метрологическими рекомендациями.

В настоящее время принята следующая классификация основных видов источников погрешности, приведенная в прил. 2 и 3.

Показатели точности измерений должны соответствовать исходным данным на разработку методики измерений [9].

Показатели точности измерений, выполняемых по методикам измерений, приведены в табл. 2 и характеризуют результаты измерений, полученные при соблюдении установленных требований.

Аттестация методик обусловлена необходимостью обеспечения единства измерений и сопоставимостью результатов, полученных разными авторами с помощью разных средств измерений.

Для реализации заданного измерения в соответствии с методикой необходим метод измерений.

## Показатели точности измерений

| Наименование показателя                                                                | Назначение (применение)                                                                                                                                                       | Дополнительные сведения                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Расширенная неопределенность измерения                                                 | Включается в результат измерений вместе с измеренным значением величины                                                                                                       | Приводится с указанием коэффициента охвата и/или уровня доверия                                                                               |
| Доверительные границы погрешности измерения                                            | Включается в результат измерений вместе с измеренным значением величины                                                                                                       | Приводится с указанием доверительной вероятности. Применяются также термин «суммарная погрешность»                                            |
| Стандартное отклонение повторяемости (СКО повторяемости). Предел повторяемости         | Характеризует разброс результатов измерений в условиях повторяемости (идентичные объекты, одна лаборатория, один оператор)                                                    | Применяются также термины: СКО сходимости, предел сходимости                                                                                  |
| Стандартное отклонение промежуточной прецизионности (СКО промежуточной прецизионности) | Характеризует разброс результатов измерений в условиях промежуточной прецизионности (идентичные объекты, одна лаборатория, разные операторы, оборудование, калибровка, время) | При варьировании одного из влияющих факторов применяются термины, указывающие на этот фактор (например предел межоператорской прецизионности) |
| Стандартное отклонение воспроизводимости (СКО воспроизводимости)                       | Характеризует разброс результатов измерений в условиях воспроизводимости (идентичные объекты, разные лаборатории, операторы)                                                  | —                                                                                                                                             |
| Систематическая погрешность лаборатории                                                | Характеризует отклонение от принятого опорного значения математического ожидания результатов измерений в данной лаборатории измеряемой величины                               | —                                                                                                                                             |
| Систематическая погрешность метода                                                     | Характеризует отклонение от принятого опорного значения математического ожидания результатов измерений                                                                        | —                                                                                                                                             |

### **1.3. Вопросы для самоподготовки**

1. Что такое прямые измерения?
2. Что такое косвенные измерения?
3. Что такое совокупные измерения?
4. Чем характеризуется процесс измерений?
5. Чем характеризуется принцип измерений?
6. Что такое метод измерений?
7. Какие применяются показатели точности измерений?
8. Какие основные направления классификации измерений?
9. Поясните какие элементы входят в структуру процесса измерений.
10. Какие существуют основные источники погрешности?

## 2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1. Принципы классификации методов измерений

*Метод измерений* – прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей в соответствии с реализуемым принципом измерений.

Процесс количественного определения физической величины исходя из определения метода предполагает многообразие вариантов. Одна и та же физическая величина может быть измерена на основании разных физических принципов и явлений. Например, температура может быть измерена с помощью контактного метода при использовании термометра, а может быть определена дистанционно по излучению с помощью пирометра. Измеряемая же в этом случае величина остается неизменной. Отсюда вытекает, что разные направления классификации основаны на некотором общем подходе, но отличаются формой сравнения и физической сущностью признака. Рассмотрим основные направления классификации.

Поскольку любая физическая величина характеризуется природой явления, то одним из направлений классификации является *физический принцип*. Физическая природа явлений разнообразна, поэтому данный вид классификации достаточно обширен (например, оптические, магнитные акустические, электрические и другие явления).

Любое явление или процесс обладают определенными характеристиками в заданные промежутки времени. В зависимости от поведения данного явления его характеристики могут изменяться или сохранять свое значение, поэтому в основу следующего направления классификации положено отображение этого свойства и соответствующего измерительного сигнала во времени. По данному признаку все методы измерений разделяют на *статические* и *динамические* [10, 11].

Процесс измерений предполагает взаимодействие средства измерений и измеряемой величины. В результате такого взаимодействия формируется

измерительный сигнал. По форме взаимодействия методы измерений разделяют на контактные и бесконтактные, так как в первом случае необходим непосредственный контакт объектов, а во втором случае информация получается дистанционно.

Измерительные сигналы являются формой отображения измерительной информации и зависят как от используемого вида средств измерений, так и от принципов его работы. В соответствии с этим классификационным признаком методы разделяют на *аналоговые и цифровые*.

Для метрологического обеспечения применяются метрологическая классификация методов измерений. Для классификации по этому признаку используется способ сравнения измеряемой величины с единицей, хранимой в средстве измерений.

По этому признаку все методы измерений разделяют на *метод непосредственной оценки* и *метод сравнения с мерой*. Поскольку при измерениях всегда происходит сравнение с мерой в виде единицы измерений, то необходимо уточнить особенности классификации по этому признаку.

***Метод непосредственной оценки*** – метод измерения, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия.

Это определение означает, что значение результата измерений получается непосредственно со шкалы средств измерений (СИ), основанного на этом методе. Например, измерение температуры термометром, определение освещенности люксметром, силы тока амперметром и т. д. Достоинством метода является быстрота получения результата, возможность непосредственного наблюдения за результатом. Его точность ограничена главным образом погрешностью самого средства измерения.

Для получения результата этим методом измерений дальнейшие вычисления или преобразования не требуются. Результат получается сразу, что способствует скорости получения информации, это очень востребовано при практическом использовании. Этот факт иногда является определяющим при выборе метода измерений.

Метод непосредственной оценки реализуется в разных видах средств измерений. Особое место и популярность среди этих средств занимают по-



казывающие приборы, что обусловлено быстротой и наглядностью получения результата. Указатель шкалы показывающих приборов следует за изменением измеряемой величины, что очень удобно при получении любой измерительной информации как при контроле параметров, так и получении информации о состоянии объекта.

К показывающим измерительным приборам непосредственной оценки относятся манометры, динамометры, барометры, амперметры, вольтметры, и многие другие. На рис. 4 приведен пример реализации метода непосредственной оценки.

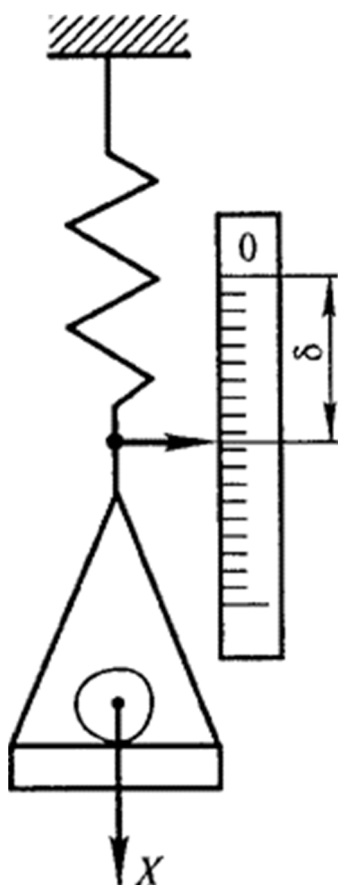


Рис. 4. Получение значения массы на пружинных весах

К этому же методу следует отнести результат, полученный с использованием интегрирующего измерительного прибора (счетчика).

Результат измерений методом непосредственной оценки получается по показаниям на шкале прибора, при этом не требуется каких-либо дополнительных вычислений. Но в некоторых случаях могут существовать множи-

тели, указанные для этого прибора, которые отображают масштаб шкала, и результат получается при умножении на этот коэффициент. Определение массы объекта на пружинных весах – пример реализации метода непосредственной оценки (см. рис. 4).

Постоянный контакт средства измерений с измеряемой величиной не является обязательным условием измерений.

Разновидностью метода непосредственной оценки является ситуация, когда контакт возникает только в момент получения результата, например, измерение некоторых габаритных размеров штангенциркулем или определение напряжения в сети тестером и др. В этом случае результат получается быстро, что очень удобно при практическом применении. К недостаткам метода непосредственной оценки можно отнести снижение точности измерений из-за погрешности градуировки шкал приборов и неконтролируемого воздействия разнообразных влияющих величин.

В методе непосредственной оценки с мерой сравнивается вся физическая величина или величина, ей пропорциональная. При этом мера хранится в измерительном приборе и отображается в форме отчетного устройства (шкалы). Функциональная схема метода приведена на рис. 5.

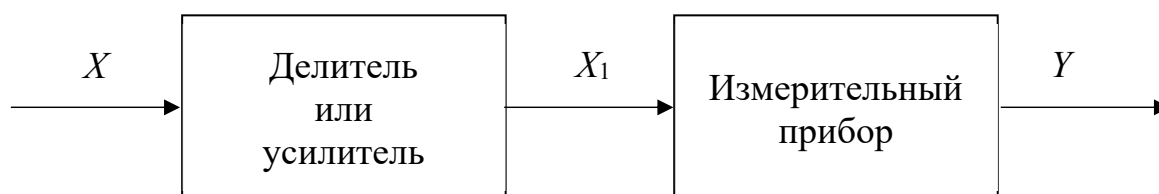


Рис. 5. Функциональная схема метода непосредственной оценки

**Метод сравнения с мерой** – метод измерения, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Способы воспроизведения меры и сравнения этой меры с измеряемой величиной могут иметь разные принципы и конструктивные решения, поэтому данный метод производства измерений требует уточнения этих особенностей. На основании индивидуальных характеристик процесса сравнения метод сравнения с мерой имеет дополнительное разделение: *дифферен-*

циальный метод, метод замещения, метод дополнения и метод совпадений и др. На рис. 6 приведена классификация и соотношение разных методов измерений в соответствии с их особенностями.

Методы сравнения с мерой сложнее в реализации измерительного эксперимента и требуют определенной квалификации оператора, но обладают большей точностью по сравнению с методом непосредственной оценки.

Общим квалификационным признаком всех вариантов *методов сравнения* являются условия сравнения между собой участвующих в процессе измерения величин. Обязательным условием для этого случая является наличие известной величины (воспроизводимой мерой), и неизвестной, измеряемой (воспроизводимой объектом). При измерениях методами сравнения используются реальные физические меры.

Дополнительным классификационным признаком при сравнении величин служат временные параметры процесса сравнения. Воздействие меры и измеряемой величины на средство измерений (СИ) может быть как *одновременным*, так и *разновременным*. Разновременное воздействие предполагает, что сравниваемые величины воздействуют на средство измерений в разные промежутки времени.

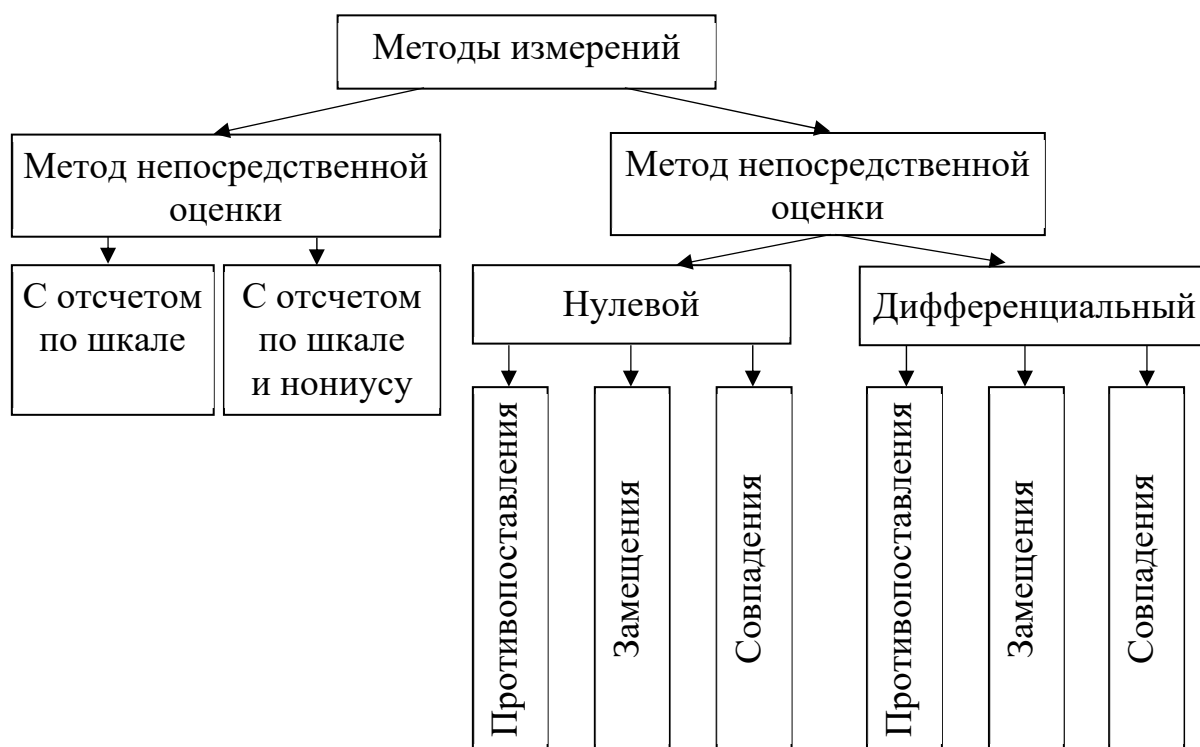


Рис. 6. Схема классификация методов измерений

К еще одной особенности процесса сравнения можно отнести форму воздействия измеряемой величины на прибор. Воздействует непосредственно сама величина, или воздействие происходит через другие величины, т. е. *опосредованно*. Например, измерение коэффициента пропускания объекта, если его изменение обусловлено концентрацией примесей. В этом случае измеряется непосредственно коэффициент пропускания, но на самом деле опосредованно на результат измерения влияет изменение концентрации примесей.

## 2.2. Сравнительный анализ методов сравнения с мерой

Рассмотрим характерные особенности методов, приведенных на схеме рис. 5.

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

Суть метода сводится в воспроизведении мерой такого же количества единиц данного свойства, как и измеряемый объект. Например, сколько единиц массы в виде гирь было положено на чаши равноплечных весов при уравнивании соответствует массе измеряемого объекта. Возможность такого измерения ограничивается набором воспроизводимых размеров меры и точностью изготовления каждого из них. Для расширения возможности применения этого метода существует некоторая его разновидность, получившая название дифференциального метода.

***Дифференциальный метод** – метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой.*

Данный метод позволяет получать точные результаты даже при использовании приборов, имеющих не очень высокие точностные характеристики, если значение величины воспроизводимой мерой достаточно близко к значению измеряемой величины. Применение этого метода позволяет

значительно расширить диапазон измерений, а точность результатов измерений при этом повышается.

Примером *дифференциального* метода могут служить измерения с помощью компаратора (прибор, предназначенный для сравнения мер).

Принцип применения такого метода поясняется схемой на рис. 7.

На средство измерений одновременно воздействуют две величины: измеряемая величина  $X$  и заданное значение этой же величины, воспроизводимое мерой  $X_0$ . Измерительный сигнал в этом случае соответствует их разности,  $\varepsilon$ . Но значение меры определено очень точно, следовательно, вся погрешность измерений будет заключаться только в измерении их разницы, поэтому чем ближе значение меры и величины, тем меньше погрешность измерений.

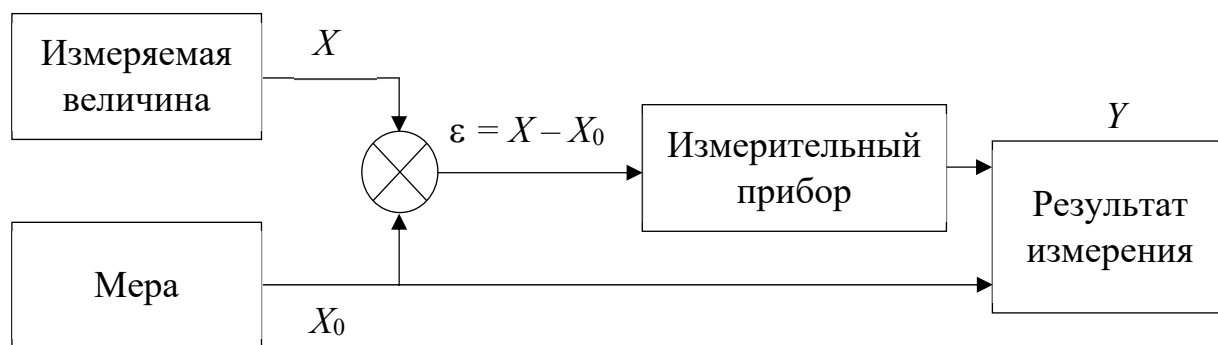


Рис. 7. Схема измерений дифференциальным методом

Реализация дифференциального метода возможна только при наличии меры высокой точности, близкой по значению к размеру измеряемой величины. Поскольку определяется только разница, то получить результаты высокой точности можно при использовании грубых средств измерений.

Проведенный анализ показывает, что если разницу  $\varepsilon$  уменьшать, то точность измерений возрастает, следовательно, возникает вывод, а можно ли ее вообще свести к нулю. В этом случае метод будет называться *нулевым*.

Преимуществом дифференциального метода при измерении малых разностных величин  $\varepsilon$  является повышении точности измерений, поскольку

погрешность результата зависит только от погрешности меры, но использовать меры с переменным значением нет необходимости.

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

Нулевой метод характеризуется нулевым значением измерительного сигнала, что соответствует равенству воздействий, оказываемых измеряемой величиной и мерой, на прибор, используемый для сравнения. В соответствии с классификацией, приведенной на рис. 5, различают нулевые методы противопоставления, замещения и совпадения.

Суть этого различия обусловлена тем, каким образом добиваются равенства измеряемой и воспроизводимой величин. Все они фактически противопоставляют одну величину другой и называются методами полного противопоставления или полного замещения соответственно. Нулевой метод так же как и дифференциальный могут быть реализованы методами противопоставления, замещения и совпадения.

**Метод противопоставления** – метод сравнения с мерой предполагает одновременное воздействие на прибор сравнения как измеряемой величины, так и величины, воспроизводимой мерой.

На рис. 8 приведена схема измерений при использовании метода противопоставления.

На схеме показано, как измеряемая величина  $X$  и мера  $X_0$  воздействуют на прибор, но на два его разных входа. Суммарный эффект воздействия определяется разностью этих величин и отображается на шкале прибора.

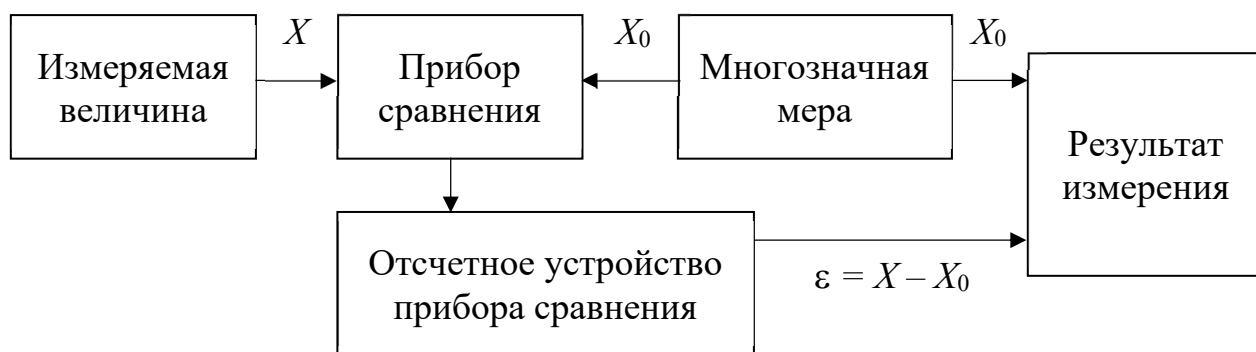


Рис. 8. Реализация метода противопоставления

Результирующий эффект воздействия определяется разностью этих воздействий, но в данном случае, в отличие от дифференциального метода, мера может менять свое значение в установленных пределах. Если разницу свести к нулю, то получим нулевой вариант. Функциональная схема нулевого метода измерения приведена на рис. 9.

При использовании меры переменного значения при измерениях следует довести величину  $\varepsilon$  до нуля. Равенство величин будет соответствовать показаниям индикатором нуля. Таким образом, наличие нулевого результата индикатора нуля указывает на равенство измеряемой и воспроизводимой величин.

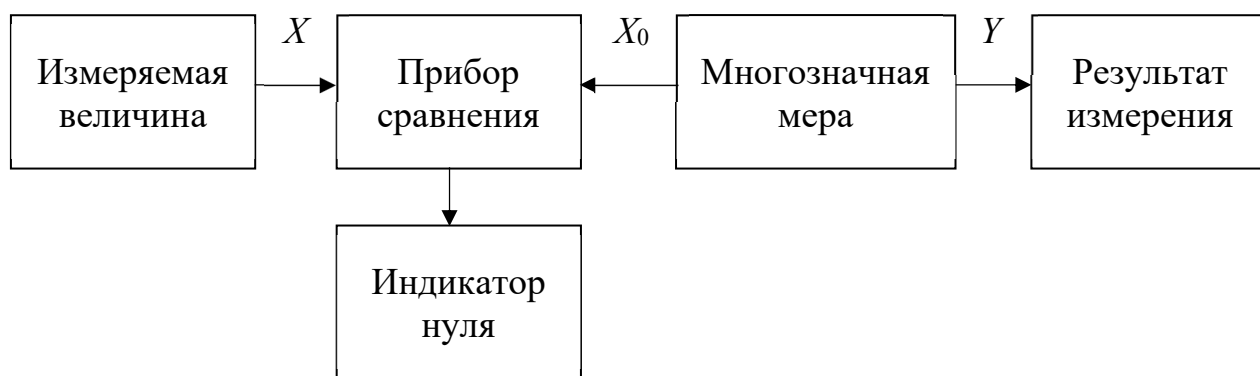


Рис. 9. Нулевой метод измерения

Анализ данного метода приводит к выводу, что предел измерения не зависит от размера измеряемой величины, а зависит от предельного значения меры и разницы между этими двумя размерами, которые можно скомпенсировать. По этой же причине чувствительность рассмотренного нулевого метода превышает чувствительность метода непосредственной оценки. Точность нулевой индикации очень высокая, что ведет к повышению точности измерения. Нулевой метод измерения имеет погрешность, которая зависит от погрешности меры и погрешности определения нулевого значения измерительного сигнала. Погрешность индикации нуля, как правило, значительно меньше погрешности меры, поэтому в большинстве случаев точность измерения нулевым методом равна точности меры.

Нулевой метод измерения применять нельзя, если нет переменной меры для данного размера физической величины. Кроме того, точность многозначных мер всегда хуже точности однозначных мер.

Примером *нулевого метода противопоставления* может служить определение разности хода с помощью интерферометра Рэлея. Состояние равновесия определяется по отсутствию смещения интерференционных полос визирующего устройства относительно нулевой отметки указателя.

Щели интерферометра выполняют роль препятствий, на которых происходит дифракция световых потоков. Дифрагировавшие световые пучки проходят через рабочие области эталонного участка и участка исследуемого объекта и при взаимодействии интерферируют.

Если оптическая длина пути эталонного участка и объекта разные, то интерференционное распределение смещается относительно начала отсчета шкалы. Изменяя разность хода эталонного участка с помощью специального механизма, интерференционное распределение возвращается на начало отсчета. Результат калиброванной разности хода эталонного участка в этом случае равен дополнительной разности хода, внесенной объектом.

Применение рассматриваемого метода противопоставления позволяет значительно уменьшить воздействие влияющих величин, поскольку искажение измерительной информации в каждом канале практически одинаково, и при противопоставлении компенсирует друг друга. Рассмотренные методы получения результата измерений предполагают одновременное взаимодействие со средством измерений как эталонного средства, так и измеряемой величины. Такой процесс измерений не всегда удобен, а иногда и невозможен. Поэтому существуют методы, при которых процесс взаимодействия этих величин происходит в разные временные промежутки.

***Метод замещения*** – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

В этом случае происходит разновременное (последовательное) воздействие измеряемой физической величины и меры на вход измерительного прибора. Особенностью этого метода является разновременное воздействие на измерительный прибор меры и измеряемой величины. Нулевой ме-



тод замещения применяют, когда необходимо исключить влияние характеристик используемого средства измерений на результат измерения. В процессе измерений мера используется вместо исследуемого объекта, заменяет его, ее изменением добиваются того же результата, что при исследуемой величине.

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

Примером такого метода может послужить измерение длины объекта с помощью штангенциркуля с нониусом. Результат измерений наблюдается при совпадении отметок на шкалах нониуса и штангенциркуля. Другим примером является определение времени при сравнении времени радиосигнала и показаниями часов. Точность данного метода ограничена погрешностями фиксации момента совпадения сигналов.

Процесс измерения методом совпадений, например, заключается в наблюдении положения метки на вращающейся детали в моменты вспышек лампы и по частоте вспышек и смещению метки на детали в этот момент определяется частота вращения. Основным достоинством метода замещения является исключение погрешности средства измерений из результата измерений. Основным достоинством метода замещения является исключение погрешности средства измерений из результата измерений.

Каждый из рассмотренных методов имеет свои особенности. Проведем сравнительный анализ рассмотренных методов.

В каждом методе погрешность результата связана с особенностью процесса его получения. Погрешность нулевого метода возникает в результате отклонения нулевого показания от условия равенства измеряемой величины и меры, т. е. процесс равенства зафиксирован не точно. Причин такого отклонения может быть множество, их перечень был приведен в разделе обсуждения процесса измерений. Для получения большой точности измерения нулевым и дифференциальным методом необходимо снижать погрешности используемых измерительных приборов. При использовании метода замещения даже заметная погрешность измерительного прибора существенного влияния на погрешность результата измерения не оказывает

и точность измерений будет выше чем у используемого средства измерений, так как точность измерения методом замещения определяется только погрешностью меры. Рассмотренное утверждение требует некоторых уточнений. При замещении используется результат сравнения, полученный при одновременном контакте замещаемых величин. За это время возможно некоторое изменение погрешности самого средства измерений, при практическом проведении измерительного эксперимента мера и измеряемая величина должны определяться одним и тем же измерительным каналом. Кроме этого, использование метода замещений предполагает равенство воздействий измеряемой величины и меры, но само это равенство тоже может быть установлено с конечной погрешностью, поэтому приборы должны быть быстродействующие и по возможности максимально чувствительные. Такой механизм получения результата показывает, что в основном надо учитывать погрешность меры, а не средства измерений.

Метод замещения и метод непосредственной оценки между собой похожи по методике проведения измерений, но метод непосредственной оценки предполагает выполнение только операции определения показаний, а вот операция градуировки меры или ее изменения производится только в процессе производства прибора и последующих периодических поверках.

В течение времени метрологические характеристики средств измерений могут меняться, но их подтверждение происходит не непрерывно, а через промежуток времени соответствующий межповерочному интервалу. Из-за этих особенностей поведения средств измерений точность метода непосредственной оценки снижается.

Выбор метода измерений определяется назначением их результатов, требованиями к скорости и точности измерений. Объединение различных методов (с учетом их достоинств и недостатков) в конструктивном устройстве средств измерений является одним из перспективных путей развития измерительной техники.

### **2.3. Вопросы для самоподготовки**

1. Чем характеризуется процесс измерений?
2. Как формируется схема процесса измерений?

3. Какое уравнение называется основным уравнением измерений?
4. В чем разница между принципом и методом измерений?
5. В чем заключаются особенности метода непосредственной оценки?
6. Как осуществляется метод сравнения с мерой?
7. Чем характеризуются косвенные измерения?
8. Как реализуется прямой метод измерений?
9. Каковы особенности метода замещения?
10. В чем различия статических и динамических измерений?

### 3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

*Средство измерения (СИ) – техническое устройство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.*

Основными классификационными признаками средств измерений являются *тип, вид и метрологическое назначение* [11–14].

*Тип – это совокупность средств измерений, имеющих одинаковую принципиальную схему, конструкцию и изготавливаемых по одним и тем же техническим условиям.*

*Вид – это совокупность типов средств измерений, предназначенных для измерений какой-либо одной физической величины.*

*По типам средства измерения подразделяются на меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи и измерительные системы.*

На рис. 10 приведена структурная схема классификации средств измерений по разным признакам.

Одним из важных принципов классификации для обеспечения единства измерений является метрологическое назначение средств измерений. По этому признаку все средства измерений подразделяют на образцовые и рабочие.

*Образцовые средства измерений предназначены для поверки по ним как рабочих, так и образцовых средств измерений менее высокой точности.*

Принципиальное место в обеспечении единства измерений отводится процессу передачи размера единиц. Передача размера единицы измерений осуществляется при процедуре поверки. Процесс заключается в сличении и передаче (приведении в соответствие) единицы образцовых средств измерений высшей точности размеру единицы рабочим и образцовым средствам измерений более низкой точности. Для регламентации правил и условий проведения поверки используется документ в форме поверочной схемы.

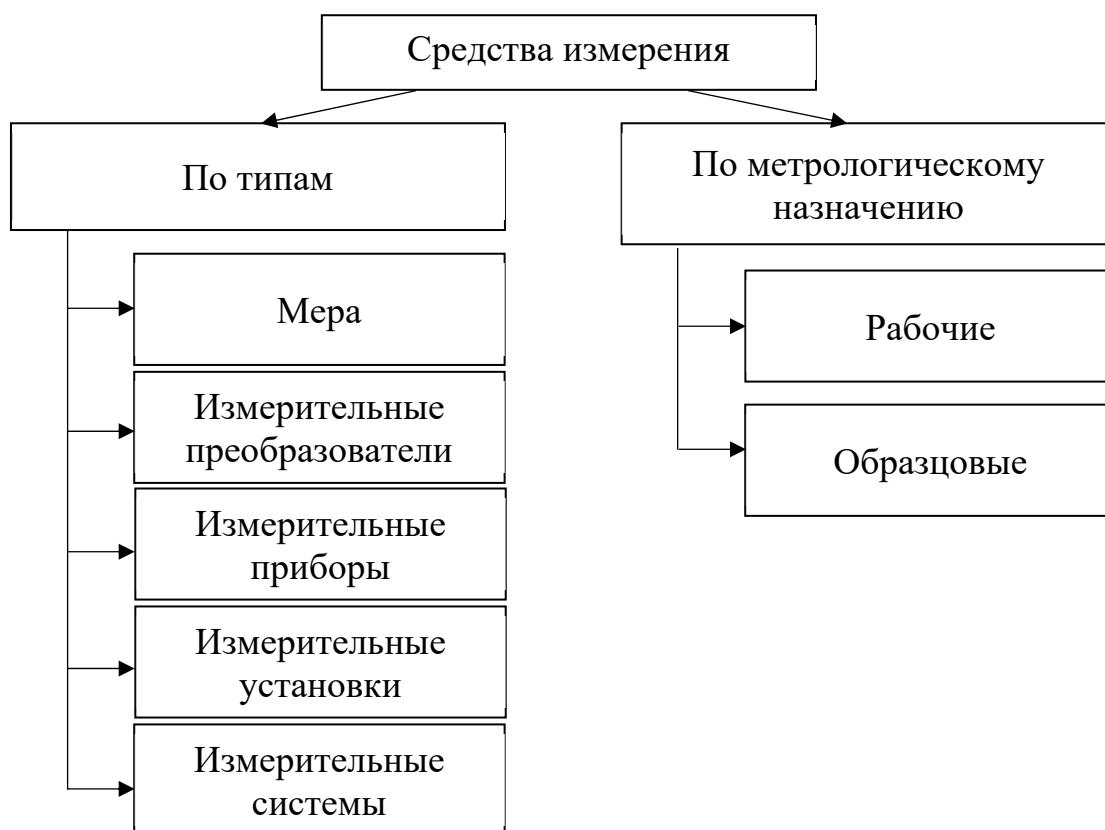


Рис. 10. Средства измерений

*Рабочие средства измерений применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц. Они предназначены для измерений размеров величин, необходимых в разнообразной деятельности человека.*

Рабочие средства измерений не могут быть применены при проведении поверки. Для проведения поверочных работ допустимо использование только тех образцовых средств, которые допустимы для этого вида поверки в соответствии с поверочной схемой.

В процессе практической деятельности необходимо помнить один из постулатов метрологии: *образцовые средства измерений для измерений не предназначены!* Справедливо и другое утверждение: *рабочие средства измерений для поверки применять нельзя, даже самые точные.*

Рабочее средство измерений само является объектом поверки и поверяется по образцовому средству измерений, имеющему более высокую точность.

По назначению проведения измерений в соответствии со схемой рис. 10 существуют следующие особенности средств измерений.

**Меры** – средства измерения, служащие для воспроизведения физической величины заданного размера.

Примером таких средств измерений могут служить гири при определении массы, концевые меры длины и др. Следует обратить внимание, что к мерам относятся также *стандартные образцы и образцовые вещества*.

**Номинальное значение меры** – значение величины, указанное на мере или предписанное ей.

Например, номинальное значение измерительного резистора имеет номинальное значение 1 Ом.

К сожалению, меры, имеющие в документе один и тот же номинал, при изготовлении имеют некоторое отклонения от указанного значения. Поэтому при изготовлении у каждой меры будет свое действительное значение. Это значение индивидуально для каждой меры.

В зависимости от того, сколько размеров может воспроизводить мера, принято различать однозначные и многозначные (переменные) меры (рис. 11). Мера, которая воспроизводит только один размер физической величины, называется *однозначной мерой*, например, плоскопараллельная концевая мера длины, или измерительная колба и т. д.

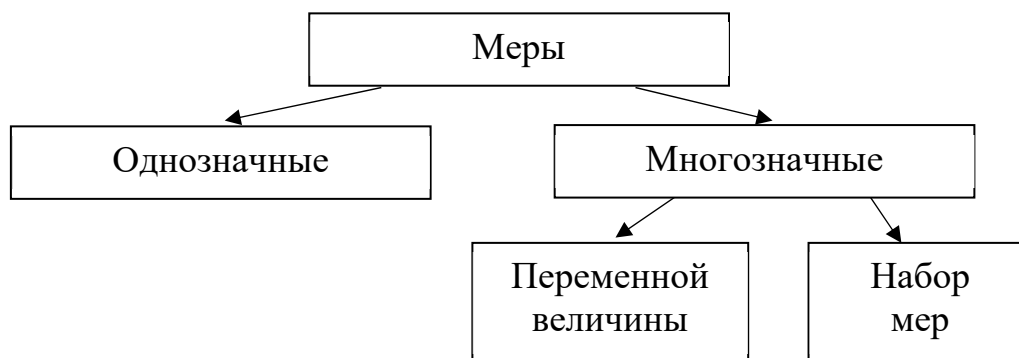


Рис. 11. Классификация мер

Мера, воспроизводящая ряд одноименных величин различного размера, называется многозначной. Этот ряд может быть непрерывным или дискретным. Примером популярных многозначных мер может служить конденсатор переменной емкости.

Как однозначные, так и многозначные меры могут объединяться в специальные наборы, такие наборы принято называть «магазины» мер.

Магазин мер – это комплект мер, которые могут при необходимости объединяться в одно целое устройство. Для создания из единичных мер заданного суммарного значения размера предусматривается специальный способ их соединения, например набор концевых мер, которые могут соединяться необходимым образом.

Для создания максимально возможных комбинаций при минимальном количестве единичных мер особые требования предъявляются к выбору ряда их количественных значений. Например, в каждом десятичном числовом разряде набор гирь строится по ряду 1; 2; 2; 5, такой набор номиналов размеров позволяет воспроизвести значения от 1 до 10. В результате используется только три номинала вместо четырех по сравнению с обычной цифровой последовательностью.

Понятно, что увеличение числа единичных мер в комплекте может привести к нарушению точности воспроизведения суммарного размера. Поэтому при создании комплектов стараются, чтобы суммарное значение набора формировалось с помощью не более чем из четырех или пяти однозначных мер. Например, стандартный набор из 87 концевых мер размерами от 0,5 до 100 мм и позволяет воспроизводить длину от 0,5 до 340 мм с интервалами от 0,005 до 0,1 мм, применяя при этом не более четырех концевых мер. Меры могут функционировать как самостоятельные средства, так и в качестве структурных элементов других средств измерений.

Другой вид средства измерений имеет совсем другое назначение и особенности. Рассмотрим средство измерений, которое называется *измерительным преобразователем*.

***Измерительный преобразователь*** – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Измерительные преобразователи самостоятельно не применяются и поэтому не имеют устройства вывода измерительной информации. Эти средства измерений входят в состав других измерительных устройств как их часть.

Принцип преобразователей действия направлен на решение одной задачи преобразовать любую физическую величину в другую физическую величину по известному закону преобразования, но основан на разнообразных физических явлениях.

Классификационные признаки измерительных преобразователей имеют разную природу, поэтому формируется несколько направлений классификации, например:

- по месту положения преобразователя в измерительной цепи;
- по физическим явлениям, положенным в их принцип действия;
- по характеру изменения входной и выходной величин и др. (рис. 12).



Рис. 12. Виды измерительных преобразователей

Физические величины могут изменяться во времени непрерывным образом, а могут иметь дискретный (прерывистый) во времени сигнал. Измерительный преобразователь при использовании непрерывных входных и выходных величины называют *аналоговым*. При цифровом характере используемых сигналов преобразователь называется *цифровым*.

Преобразование входной величины в выходную может происходить по определенному правилу – коду, тогда преобразователи называются *кодowymi*.

При определенных условиях и принципах работы измерительный сигнал в таких средствах может преобразоваться из непрерывной величин в кодовый сигнал (аналог-код), а может и наоборот, кодовый сигнал в сигнал, непрерывный по значению (код-аналог).



По месту, занимаемому в измерительной цепи, средства измерения, преобразователи подразделяются на первичные, передающие, промежуточные, выходные и обратные. В табл. 3 приведены особенности работы преобразователей разных типов.

Таблица 3

Особенности работы преобразователей

| Наименование преобразователя | Место в измерительной цепи                                  | Цель преобразования                                                  | Пример реализации                                |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Первичный                    | Контакт с входной величиной                                 | Другая физическая величина, удобная для дальнейшего использования    | Фотокатод в системе фотоэлектрического усилителя |
| Передающий                   | Любое место измерительной цепи                              | Преобразование для дистанционной передачи сигнала                    | Радиоантенна                                     |
| Промежуточный                | Место в измерительной цепи после первичного преобразователя | Преобразование для дальнейшего преобразования                        | Система диодов в фотоумножителе                  |
| Выходной                     | Последний в измерительной цепи                              | Формирует выходной сигнал                                            | Изображение на мониторе                          |
| Обратные                     | В цепи обратного преобразования                             | Формирует сигнал сравнения                                           | Компаратор                                       |
| Масштабные                   | Промежуточное преобразование                                | Увеличивает значение величины без изменения вида физической величины | Усилитель яркости                                |

*Конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь, от которого поступают сигналы измерительной информации, называется **датчиком**.*

Особенность применения датчиков и их характеристики будут рассмотрены далее. Датчик может находиться на значительном расстоянии от средства измерений, принимающего его сигналы. Например, датчики космических спутников передают информацию об их физических параметрах.

Все средства измерений в том или ином виде потребляют энергию. Однако существуют преобразователи, которые не требуют внешнего источника питания, так как используют энергию входной величины, такие преобразователи называются *генераторными*. Например, внешний фотоэффект.

Если преобразователь является конструктивно обособленным, то его метрологические характеристики нормируются в соответствии с установленными требованиями. При объединении нескольких преобразователей совместно с другими элементами в одну конструкцию, образующую единый прибор, метрологические характеристики нормируются только для всего измерительного прибора. Такие особенности определения метрологических характеристик применяются при построении измерительных средств, состоящих из нескольких измерительных блоков, или при построении измерительных установок и систем, которые могут включать множество различных измерительных преобразователей.

Рассмотренные особенности измерительных преобразователей показывают, что они часто используются как отдельные части сложных систем, поэтому важно оценить возможность их замены при поломке. По признаку заменяемости в системе измерительные преобразователи разделяются на *взаимозаменяемые*, *ограниченно-взаимозаменяемые* и *невзаимозаменяемые (индивидуальные)*.

Термин *взаимозаменяемые* указывает на отсутствие ограничений при замене, поскольку режим работы прибора при такой замене не изменится. Для обеспечения возможности такой замены метрологические характеристики преобразователей нормируются и устанавливается стандартный ряд коэффициентов преобразования. Коэффициент преобразования определяется отношением значений величин на входе и на выходе преобразователя. Постоянство значений коэффициента преобразования на всем диапазоне его работы очень важно при замене этого элемента прибора. На основании рассмотренных правил установления определенных значений для характеристик преобразователей можно значительно повысить унификацию изделий и их ремонтпригодность.

Для снижения влияния преобразователя на общую точность измерения для большинства взаимозаменяемых преобразователей устанавливают

классы точности. При выборе преобразователя следует учитывать, чтобы его класс точности был выше класса точности измерительного прибора, в котором данный преобразователь установлен. Высокие требования к характеристикам взаимозаменяемых преобразователей ограничивает их практическое применение. Поэтому преобразователи этого типа используют только для измерительного прибора одного вида или типа, а иногда даже только одной модификации его конструкции. Область и условие применения преобразователя указывается в сопроводительных документах.

Применение индивидуальных (невзаимозаменяемых) преобразователей, предназначенных для конкретных изделий, позволяет улучшить метрологические характеристики измерительного прибора или установки за счет предусмотренных специальных регулировок.

Следующий вид средства измерений называется *измерительный прибор*.

***Измерительный прибор*** – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительные приборы очень разнообразны и отличаются конструкцией, принципом действия и др. Общим для всех измерительных приборов является наличие элемента конструкции, позволяющего получить измерительную информацию и получившего наименование *отсчетное устройство*.

По способу отсчета значений измеряемой величины приборы подразделяются на *показывающие*, т. е. допускающие только отсчитывание показаний и *регистрирующие*, в которых предусмотрена регистрация показаний.

Измерительные приборы состоят из чувствительного элемента, который находится под непосредственным воздействием физической величины, измерительного механизма и отсчетного устройства. Отсчетное устройство показывающего прибора имеет шкалу и указатель, выполненный в виде материального стержня – стрелки или в виде луча света – светового указателя. *Шкала* представляет собой совокупность отметок и проставленных у некоторых из них чисел отсчета, соответствующих ряду последовательных значений величины. Шкалы с делениями постоянной длины называют *равномерными*.

Длина деления шкалы  $J$  – расстояние между осями (или центрами) двух соседних отметок шкалы. Цена деления шкалы  $l$  – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

Чувствительность прибора определяется отношением сигнала на выходе прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Абсолютную чувствительность прибора  $Q$  определяют по формуле

$$Q = \frac{A}{h}, \quad (5)$$

где  $A$  – значение сигнала на выходе прибора;

$h$  – значение входной величины.

Выработка измерительной информации может основываться на использовании различных физических принципов. Например, для измерения длины применяют механические, оптические, пневматические и электрические измерительные приборы.

Физический принцип, положенный в основу построения измерительного прибора, называют *принципом действия прибора*, который часто отражается в названии прибора (электродинамический ваттметр, термоэлектрический термометр).

Принципиально измерительный прибор состоит из ряда измерительных преобразователей, каналов связи, согласующих элементов, измерительного механизма, которые в совокупности образуют измерительную цепь прибора. Измерительная цепь осуществляет все преобразования сигнала измерительной информации.

Измерительная цепь начинается чувствительным элементом, являющимся составной частью первичного преобразователя. На элемент непосредственно воздействует измеряемая величина. Оканчивается цепь отсчетным устройством, с помощью которого наблюдатель определяет значение измеряемой величины, выраженное в принятых единицах измерения. Это значение называют *показанием средства измерения*, которое образуется от отсчета (отвлеченного числа), снятого при измерении с отсчетного устройства прибора. Переход от отсчета к показанию осуществляется умножением отсчета на цену деления шкалы, под которой понимается разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

Измерительные приборы можно классифицировать по различным признакам: структуре преобразования, виду выходной информации, способу ее выдачи, роду измеряемой величины, условиям применения и т. д. Классификация измерительных приборов с учетом этих признаков представлена на рис. 13.

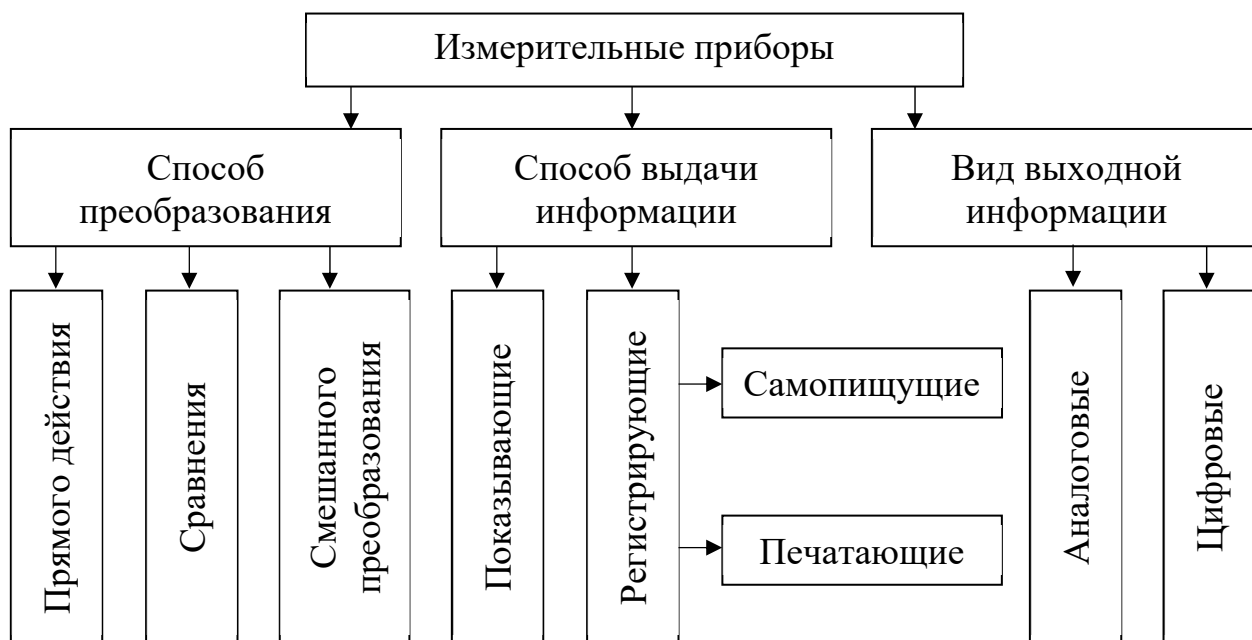


Рис. 13. Классификация измерительных приборов

Измерительные приборы по своей структуре представляют собой определенное сочетание измерительных преобразователей и устройства сравнения. Для условного изображения структуры прибора используется функциональная схема. По ней можно проследить все преобразования, которым подвергается измеряемая величина в процессе работы прибора.

Приведенная классификация показывает, что на базе рассмотренных принципов и методов измерений существует огромное количество разнообразных средств измерений, подробное рассмотрение которых предполагает продолжение материала в последующих изданиях учебных пособий.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Структура данного пособия помимо теоретических сведений включает в себя примеры используемых средств измерений, методов получения результата и практических расчетов. Многообразие измерительных задач охватывают множество как теоретических, так и практических направлений.

В настоящем учебном пособии рассмотрены лишь некоторые вопросы описания средств и методов измерений, а также прикладных аспектов их эксплуатации и связанных с ними прикладных задач. Поэтому данное пособие не может являться заменой учебников по метрологическому обеспечению измерительных процессов. Получить более подробную информацию можно из литературных источников, приведенных в библиографическом списке или иной литературе, касающейся информации по рассмотренным вопросам.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эйлер Л. Основания алгебры Леонарда Эйлера 1-ой ч. отд. 3. Об отношениях и пропорциях. Т. 2. – М. : ЛитРес, 2010. – 306 с.
2. ГОСТ Р 8.000–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2016. – 11 с.
3. ГОСТ Р 8.563–2009. ГСИ. Методики измерений. – М. : Стандартинформ, 2010. – 28 с.
4. РМГ 29–2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2013. – 60 с.
5. ПР 50.2.104–09. ГСИ. Порядок проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа. – М. : Стандартинформ, 2010. – 12 с.
6. РМГ 29–99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные требования и определения. – М. : Стандартинформ, 2000. – 28 с.
7. Грибанов Д. Д. Общая теория измерений : монография. – М. : ИНФРА-М, 2015. – 116 с.
8. Каплан Б. Ю. Физические основы получения информации : учеб. пособие. – М. : ИНФРА-М, 2014. – 286 с.
9. ГОСТ Р ИСО 5725-1–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. – М. : Стандартинформ, 2002. – 21 с.
10. ГОСТ 8.315–97. ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. – Минск : Стандартинформ, 1998. – 28 с.
11. МИ 2222–92. Государственная система обеспечения единства измерений. Виды измерений. Классификация. – М. : Стандартинформ, 1992. – 11 с.
12. ГОСТ Р 8.820–2013. ГСИ. Метрологическое обеспечение. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2013. – 11 с.
13. МИ 1317–2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы

представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров. – М. : ФГУП ВНИИМС, 2004. – 22 с.

14. РМГ 62–2003. ГСИ. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации. – М. : Стандартиформ, 2008. – 18 с.



## ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

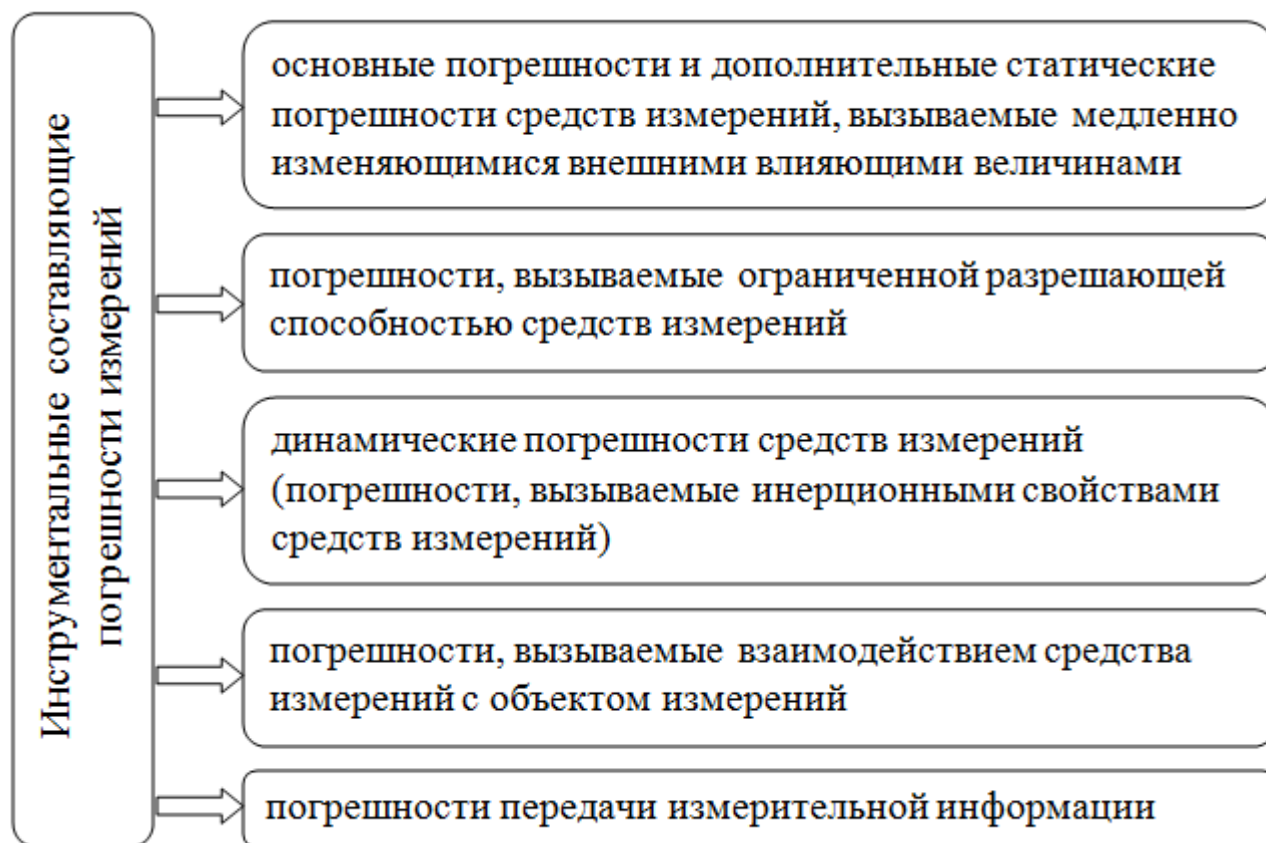
| Название величины | Обозначение величины | Название единицы | Обозначение единицы | Определение единицы величины                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Время             | $t$                  | секунда          | с (s)               | Секунда – единица времени в SI. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения частоты перехода сверхтонкого расщепления невозмущенного основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu_{Cs}$ равным 9 192 631 770 при выражении в единице Гц, что соответствует $s^{-1}$              |
| Длина             | $l, x, r$<br>и т. д. | метр             | м (m)               | Метр – единица длины в SI. Он определяется путем принятия фиксированного числового значения скорости света в вакууме $c$ равным 299 792 458 при выражении в единице $m \cdot s^{-1}$ , где секунда определяется через частоту перехода в цезии $\Delta\nu_{Cs}$                                          |
| Масса             | $m$                  | килограмм        | кг (kg)             | Килограмм – единица массы в SI. Он определяется путем принятия фиксированного числового значения постоянной Планка $h$ равным $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ при выражении в единице Дж/с, что соответствует $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ , где метр и секунда определяются через $c$ и $\Delta\nu_{Cs}$ |
| Электрический ток | $I, i$               | ампер            | А (A)               | Ампер – единица электрического тока в SI. Он определяется путем принятия фиксированного числового значения элементарного заряда $e$ равным $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ при выражении в единице Кл, что соответствует $A \cdot s$ , где секунда определяется через $\Delta\nu_{Cs}$                  |

| Название величины             | Обозначение величины | Название единицы | Обозначение единицы | Определение единицы величины                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------------------------|----------------------|------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Термодинамическая температура | $T$                  | кельвин          | К (K)               | Кельвин – единица термодинамической температуры в SI. Он определяется путем принятия фиксированного числового значения постоянной Больцмана, $k$ равным $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ при выражении в единице Дж $\cdot$ К $^{-1}$ , что соответствует кг $\cdot$ м $^2$ $\cdot$ с $^{-2}$ $\cdot$ К $^{-1}$ , где килограмм, метр и секунда определяются через $h$ , $c$ и $\Delta\nu_{Cs}$                                                                                                                 |
| Количество вещества           | $n$                  | моль             | моль (mol)          | Моль – единица количества вещества в SI. Один моль содержит точно $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ структурных элементов. Это число есть фиксированное числовое значение постоянной Авогадро, $N_A$ , выраженное в единице моль $^{-1}$ и называемое числом Авогадро. Количество вещества в системе, обозначение $n$ , является мерой количества конкретных структурных элементов. Структурными элементами могут быть атомы, молекулы, ионы, электроны и любые другие частицы или определенные группы частиц |
| Сила света                    | $I_v$                | кандела          | кд (cd)             | Кандела – единица силы света в заданном направлении в SI. Она определяется путем принятия фиксированного числового значения световой эффективности монохроматического излучения частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, $K_{\text{кд}}$ , равным 683 в единице лм $\cdot$ Вт $^{-1}$ или кд $\cdot$ ср $\cdot$ кг $^{-1}$ $\cdot$ м $^{-1}$ $\cdot$ с $^3$ , где килограмм, метр и секунда определяются через $h$ , $c$ и $\Delta\nu_{Cs}$                                                                        |

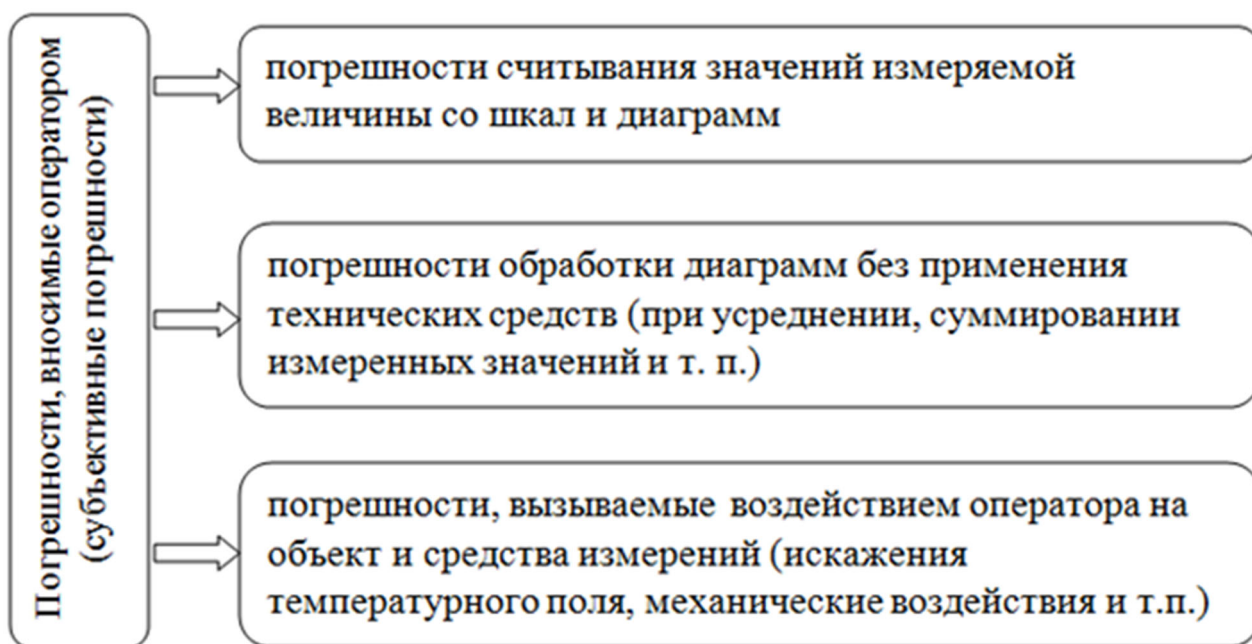
## МЕТОДИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ



## ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ



## СУБЪЕКТИВНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ



*Учебное издание*

**Шувалов Геннадий Владимирович**

**Вихарева Надежда Анатольевна**

**Симонова Галина Вячеславна**

# **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ**

Редактор *Ю. С. Мерзликина*

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 04.10.2022. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 3,14. Тираж 70 экз. Заказ 160.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.