

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

---

Кафедра «Машиноведение, проектирование,  
стандартизация и сертификация»

В.Д. ГВОЗДЕВ

ПРИКЛАДНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: ВЕЛИЧИНЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

Рекомендовано редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебного пособия  
по дисциплине  
«Метрология, стандартизация и сертификация»

Москва -2015

УДК 389.001

Г-25

Гвоздев В.Д. Прикладная метрология: Величины и измерения. Учебное пособие. - М.: МИИТ, 2015. – 74 с.

Рассматриваются основные понятия метрологии, а также научные и технические основы обеспечения единства измерений.

Для студентов высших учебных заведений, изучающих дисциплину «Метрология, стандартизация и сертификация».

© ФГБ ОУ ВПО «Московский  
государственный университет  
путей сообщения», 2015

# 1. Научные основы обеспечения единства измерений

## 1.1. Измерение. Шкалы измерений

Известное изречение гласит «все познается в сравнении». Сравнение - познавательная операция, заключающаяся в нахождении сходства и различия между предметами, явлениями, событиями и лежащая в основе суждений о сходстве или различии объектов. (Под *объектами* здесь и далее подразумеваются материальные тела, вещества, процессы, явления, события и т.п., их свойства и состояния.)

Сравнение - один из главных способов познания окружающего мира. При сравнении устанавливают закономерности, присущие объектам, системам объектов и их характеристикам. Если один объект или его характеристика используются как основа для определения других объектов или характеристик, то его/её рассматривают как меру сравнения (меру). А процедуру сравнения с мерой (определения мерой – Ожегов С.И. Словарь русского языка, 1985 г.) называют *измерением*. При сравнении меры могут быть представлены в виде образцов продукции, описаний или изображений животных и растений, образцов состава или свойств веществ, графиков, формул, мер длины и т.д.

Для идентификации объектов и их характеристик во множестве их проявлений требуется большое количество и разнообразие мер. С учетом особенностей измеряемых объектов и задач измерений меры группируют и используют для построения *шкал измерений*.

**Шкала измерений** – упорядоченное множество проявлений количественных или качественных характеристик объектов, а также самих объектов. Указанное множество может быть образовано из наименований и обозначений (в том числе в цифровой форме) объектов и их характеристик, а также из значений и числовых значений (для количественных характеристик).

Согласно РМГ 83-2007 [4] «шкала измерений – отображение множества различных проявлений количественного или качественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений)». «*Измерение* – сравнение конкретного проявления измеряемого свойства (величины) со

шкалой измерений этого свойства (величины) в целях получения результата измерений (оценки свойства или значения величины)».

На шкалах измерений меры могут присутствовать непосредственно - в вещественной форме или опосредствованно в виде меток (наименований, обозначений, графических символов, чисел и т.п.), в соответствие которым поставлены конкретные вещественные меры или их описания. Меткам устанавливают определенные позиции на шкале. Промежуточные позиции (отметки) шкалы могут быть получены путем разбиения её на интервалы на основе выбранного принципа построения шкалы. В этом случае позиции, которым соответствуют меры, выступают в качестве опорных (реперных) точек.

Под *качественной характеристикой* в определении шкалы измерений и далее понимается описание объектов, их свойств и состояний, в словесной форме, в том числе с использованием наименований и обозначений.

*Количественная характеристика* – характеристика, которая может быть представлена числовым значением, равным отношению количественного содержания этой характеристики к её базовой реализации, называемой *единицей измерения*.

В теории измерений различают пять основных типов шкал: наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные. (Тип шкалы - набор признаков, классифицирующий данную шкалу измерений).

***Шкала наименований*** – шкала, состоящая из множества наименований (обозначений) объектов или проявлений их характеристик, в соответствии которым поставлено описание объекта (конкретная реализация объекта, его графическое изображение, математическая формула, график и т.п.) или проявлений его характеристик.

Наименование (обозначение) в этом случае рассматривают как обобщенную характеристику объекта или его свойств и состояний. С помощью шкалы наименований устанавливают эквивалентность (равноценность) измеряемого объекта или его характеристик и описания, поставленному в соответствие тому или иному наименованию (обозначению). Это позволяет отнести объект к какой-либо группе или выделить его, путем присвоения

индивидуального наименования (обозначения), после чего наименования (обозначения) применяются как идентификаторы объектов (характеристик объектов). При построении шкал наименований могут использоваться числа, но лишь как метки объектов. Примерами таких шкал являются: атласы цветов (до 1000 наименований), запахов (сырой, затхлый, кислый и т.д.), вкуса (чистый, полный, гармоничный и т.д.); множество номеров телефонов, автомашин, паспортов; разделение людей по полу, расе, национальности; классификаторы промышленной продукции, специальностей высшего образования; терминологические справочники и т.п.

Числа, знаки, обозначения, наименования, составляющие шкалу наименований, разрешается менять местами. Для результатов измерений, полученных с использованием этой шкалы, нет отношений типа "больше — меньше", не применимы понятия единица измерения, нуль, размерность. С ними могут проводиться только некоторые математические операции. Например, числа нельзя складывать и вычитать, но можно подсчитывать, сколько раз (как часто) встречается то или иное число.

**Шкала порядка** – шкала наименований (обозначений) объектов или проявлений их характеристик, расположенных в порядке возрастания или убывания по уровню проявления или значимости. Процедура расположения по порядку возрастания или убывания называется *ранжированием* (выстраиванием по рангу). Фиксированные точки на шкале порядка называют опорными или реперными. Отсюда происходит другое название шкал порядка - *реперные шкалы*. У реперных шкал может присутствовать нулевая отметка. Однако единица измерения для них отсутствует. Часто отметки шкал порядка и, соответственно, результаты измерений – это числовые метки (баллы, степени, уровни).

Недостаток реперных шкал - неопределённость интервалов между реперными точками.

Примеры шкал порядка: пятибалльная система оценок знаний учащихся, оценка уровня мастерства спортсменов на соревнованиях, шкала ветров по Бофорту ("штиль", "слабый ветер", "умеренный ветер" и т.д.), шкала силы землетрясений. В

минералогии используется шкала Мооса, по которому минералы классифицируются согласно критерию твердости. А именно: тальк имеет балл 1, гипс - 2, кальций - 3, флюорит - 4, апатит - 5, ортоклаз - 6, кварц - 7, топаз - 8, корунд - 9, алмаз - 10. Минерал с большим номером является более твердым, чем минерал с меньшим номером, при нажатии царапает его. Здесь же следует упомянуть шкалы твердости Бринеля, Виккерса, Роквелла. Номера домов также измерены в порядковой шкале - они показывают, в каком порядке стоят дома вдоль улицы. Номера томов в собрании сочинений писателя или номера дел в архиве предприятия обычно связаны с хронологическим порядком их создания.

Порядковые шкалы используют при оценке качества продукции и услуг в квалиметрии (буквальный перевод: измерение качества). Так единица продукции оценивается как годная или не годная. При более тщательном анализе используется шкала с тремя градациями: есть значительные дефекты - присутствуют только незначительные дефекты - нет дефектов. Иногда применяют четыре градации: имеются критические дефекты (делающие невозможным использование) - есть значительные дефекты - присутствуют только незначительные дефекты - нет дефектов. Аналогичный смысл имеет сортность продукции - высший сорт, первый сорт, второй сорт,...

Оценки экспертов часто осуществляются с использованием шкал порядка. Типичным примером являются задачи ранжирования и классификации промышленных объектов, подлежащих экологическому страхованию.

В отличие от шкалы наименований шкала порядка позволяет не только установить факт равенства или неравенства измеряемых объектов, но и определить характер неравенства в виде суждений: "больше — меньше", "лучше — хуже" и т.п. Однако нельзя утверждать, что землетрясение в 2 балла (лампа качнулась под потолком) ровно в 5 раз слабее, чем землетрясение в 10 баллов (полное разрушение всего на поверхности земли).

Шкалы наименований и порядка, для которых не определены единицы измерений, называют также *условными шкалами* или не метрическими шкалами.

**Шкала разностей (интервалов)** – шкала значений количественной характеристики, для которой существует условная (принятая по соглашению) единица измерения (масштаб) и условный нуль, устанавливаемый произвольно либо в соответствии с некоторыми традициями и договоренностью. Шкала интервалов – это шкала порядка, в которой числа не только упорядочены по рангам, но и разделены определенными интервалами. Это позволяет судить не только о том, что одна величина больше другой, но и на сколько больше. Для результатов измерений, полученных с использованием шкал интервалов, возможны такие математические действия, как сложение и вычитание, применимы процедуры определения математического ожидания, стандартного отклонения и др. Однако сказать во сколько раз одна величина больше другой невозможно, так как начало отсчета (нулевая точка) выбирается произвольно.

Примерами шкал интервалов являются шкалы времени и температуры (в градусах Цельсия или Фаренгейта). По шкале *интервалов* измеряют потенциальную энергию или координату точки, расположенной на прямой. В этих случаях на шкале нельзя отметить ни естественное начало отсчета, ни естественную единицу измерения. Исследователь должен сам задать точку отсчета и сам выбрать единицу измерения. Допустимыми преобразованиями в шкале интервалов являются линейные возрастающие преобразования, т.е. линейные функции. Температурные шкалы Цельсия и Фаренгейта связаны именно такой зависимостью:  $^{\circ}C = 5/9 (^{\circ}F - 32)$ , где  $^{\circ}C$  – температура (в градусах) по шкале Цельсия, а  $^{\circ}F$  – температура по шкале Фаренгейта.

**Шкала отношений** – шкала значений количественной характеристики, для которой определена (по соглашению) единица измерения и существует *естественный* нуль, не зависящий от произвола наблюдателя (например, абсолютный нуль температурной шкалы). Шкалы отношений – это шкалы длин, термодинамической температуры, массы, силы света, уровня звука, жесткости воды и многих других количественных характеристик. Любое измерение по шкале отношений заключается в сравнении

количественной характеристики с единицей измерения и выражении первой через вторую в кратном или дольном отношении.

Это наиболее совершенная и информативная шкала. Результаты измерений, полученные при использовании этой шкалы, можно вычитать, умножать и делить. В некоторых случаях возможна и операция суммирования. Допустимость тех или иных математических операций определяется природой количественной характеристики.

**Абсолютная шкала** – шкала числовых значений количественной характеристики. Отличительные признаки абсолютных шкал: наличие естественного нуля и отсутствие необходимости в единице измерений. С использованием абсолютных шкал измеряют коэффициенты усиления, ослабления, амплитудной модуляции, нелинейных искажений, отражения, коэффициент полезного действия и т. п. Результаты измерений в абсолютных шкалах при необходимости выражают в процентах, промилле, байтах, битах, децибелах.

Разновидностью абсолютных шкал являются дискретные (счетные) шкалы, в которых результат измерения выражается числом частиц, квантов, или других объектов, эквивалентных по проявлению измеряемого свойства. Например, шкалы для электрического заряда ядер атомов, числа квантов (в фотохимии), количества информации. Иногда за единицу измерений (со специальным названием) в таких шкалах принимают какое-то определенное число частиц (квантов), например один моль – число частиц, равное числу Авогадро.

Абсолютную шкалу, диапазон значений которой находится в пределах от нуля до единицы (или некоторого предельного значения по спецификации шкалы) называют абсолютной ограниченной шкалой.

Шкалы разностей (интервалов), отношений и абсолютные классифицируют как *метрические или физические шкалы*. Эти шкалы допускают логарифмическое преобразование, часто применяемое на практике, что приводит к изменению типа шкал. Такие шкалы называют *логарифмическими*. Практическое



распространение получили логарифмические шкалы на основе применения систем десятичных и натуральных логарифмов, а также логарифмов с основанием два.

Практически реализация шкал измерений достигается путем стандартизации как самих шкал и единиц измерений, так и, при необходимости, способов и условий (спецификаций) их однозначного воспроизведения.

Измерение с помощью шкал заключается в установлении соответствия объекта или его характеристики отметке на шкале измерений. После чего объекту измерений приписывают количественную или качественную определенность, соответствующую выявленной отметке шкалы.

Вопросы измерений количественных характеристик объектов являются предметом области знаний, называемой *метрологией*.

## 1.2. Основные понятия метрологии

*Метрология - область знаний об измерениях величин.* Она возникла тогда, когда появилось осознание различия качества одних и тех же или подобных по назначению объектов и потребность это качество оценивать. Современная метрология включает три составляющие: теоретическую метрологию, законодательную и практическую.

*Теоретическая метрология* – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Поскольку измерения относятся к числу повторяющихся задач, они и вопросы, связанные с ними, являются объектами стандартизации. Совокупность нормативно-технических документов, законов и законодательных актов, регламентирующих требования к единицам измерения, методам и средствам измерений, условиям измерений, методам обработки полученных результатов и др. составляют основу *законодательной метрологии*.

*Практическая (прикладная) метрология* применяет результаты теоретической и законодательной метрологии в различных сферах деятельности.

Как любая область знаний метрология оперирует специфическими понятиями. Рассмотрим основные из них.

**Измерение** (в общем случае) – идентификация величины во множестве её качественных и количественных проявлений.

(Под качественными проявлениями следует понимать такие свойства величины как её изменчивость, соответствие закономерности изменения какому-либо теоретическому закону, взаимосвязь с основными величинами, зависимость от других величин и т.п.)

Измерения выполняют с целью:

- получения информации о величине;
- установления взаимосвязи между величинами;
- оценки качества продукции;
- определения или подтверждения характеристик средств измерений и методик выполнения измерений.

Термин **величина** в метрологии используется как синоним для *многообразных наименований количественных характеристик объектов* (явлений, процессов, событий, материальных тел или веществ, и т.п., их свойств и состояний). Введение такого термина позволяет установить общие закономерности формирования результатов измерений и правила математических действий с ними независимо от природы количественных характеристик и особенностей объектов измерений.

В «*Международном словаре по метрологии*» (VIM3) [8] термин «**величина/количество**» раскрывается как "характеристика явления, тела или вещества, имеющая значительность».

В действующих нормативных документах и в книгах по вопросам метрологии встречается термин «**физическая величина**», эквивалентный термину «величина».

Количественные характеристики и, следовательно, величины делят на измеряемые и оцениваемые. **Измеряемые величины** – величины, для которых однозначно определены единицы измерения. Измерение таких величин – *предмет метрологии*. **Оцениваемые величины** – величины, для которых единицы измерения умозрительны или условны, основаны на сложившихся представлениях или принятых по договоренности правилах, либо вообще отсутствуют.

Для задач, решаемых в метрологии, важно деление величин на **постоянные и переменные**. Если для описания постоянной величины достаточно её значения, то для переменной величины рассматривают закономерность её изменения, амплитудно-частотные характеристики, параметры, полученные в результате статистической обработки или по принятым правилам и др.

Применительно к постоянным величинам **«измерение** – процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине» [3, 8].

**Значение величины** - количественная определенность величины, представленная в виде некоторого числа принятых для нее единиц измерения. Если совсем коротко, **«значение величины** - число и единица измерения».

Упомянутое число в метрологии называют **«числовым значением величины»**.

**Единица измерения** – величина, определенная и принятая по соглашению, используемая для сравнения с ней других величин при выполнении измерений.

Количественная определенность величины и её значение не существуют и не могут рассматриваться вне связи с объектом измерения и другой измерительной информацией (место, условия, время измерения и т.д.). Например, длина равная 0,5 метра, без указания объекта измерения, может быть и диаметром детали, и расстоянием между объектами, и длиной участка на котором выполняются измерения.

Исходя из приведенных определений, измерение можно представить как процедуру, посредством которой находят соотношение между величиной  $X$  и единицей измерения этой величины  $[X]$ .

Математически точное отношение  $X / [X]$ , назовем **истинным числовым значением** -  $x_{и}$  величины, а произведение  $x_{и} \cdot [X]$  - **истинным значением** величины.

Вследствие несовершенства методов и средств измерений познание истинного значения величины невозможно. Это понятие необходимо как теоретическая основа развития измерений.

При измерении получают оценку значения величины в виде  $x \cdot [X]$ , где  $x$  - экспериментальное *числовое значение* величины.

При записи формул в метрологии значение величины обозначают той же буквой, что и величину. То есть вместо  $x \cdot [X]$  пишут  $X$ .

Отклонение оценки (измеренного) значения  $X$  величины от истинного значения  $X_{и}$  называют ***погрешностью измерения***

$$\Delta = X - X_{и}. \quad (1)$$

При решении конкретной измерительной задачи задают максимально допустимое значение погрешности измерений (допустимую погрешность)  $[\Delta]$ . При соблюдении соотношения  $\Delta \leq [\Delta]$  экспериментальное значение называют ***действительным значением*** величины.

***Действительное значение*** – значение величины, найденное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Допустимую погрешность измерения  $[\Delta]$  назначают в зависимости от цели измерений.

Выполнение условия  $\Delta \leq [\Delta]$  является определяющим для обеспечения ***единства измерений***, под которым понимается такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

### 1.3. Единицы измерений

Числовые значения величин и значения величин зависят от выбора единицы измерения.

Большая часть истории человечества связана с использованием субъективных единиц, которые часто отождествлялись с размерами и названиями частей человеческого тела (вершок – длина фаланги указательного пальца, дюйм – длина сустава большого пальца, пядь – расстояние между концами большого и среднего пальцев руки,

фут – длина ступни ), либо устанавливались с помощью подручных средств (карат – вес горошины, колодец – единица площади, которую можно полить из одного колодца, соха – площадь, обрабатываемая за день одной сохой).

Развитие метрологии обуславливалось потребностями торговли, строительства, военного дела, сбора налогов и податей и другими факторами. В какой-то момент появились вещественные меры и единицы измерений: песочные и водяные часы, сосуды для измерения объемов – ведро, осьмина, штоф. Так «золотой пояс» великого князя Святослава Ярославича (1070 г.) служил образцовой мерой длины; в Новоторговом указе 1667 г. были установлены размеры фунта и сажени.

Многообразие единиц измерений в 17, 18 веках стало препятствием для развития торговли, промышленности и, особенно, науки. Появилась настоятельная необходимость по упорядочению единиц измерения, созданию системы единиц. Первопроходцем в этом деле стала Франция: 7 апреля 1795 года Конвент принял закон о введении во Франции метрической системы мер. Система строилась на основе единицы длины – метра. За единицу площади принимался  $m^2$ , объема  $m^3$ , за единицу массы – килограмм (масса 1  $дм^3$  воды при  $4^\circ C$ . (Т.о. 7.04.1795 г. можно считать Днем рождения законодательной метрологии). Международное признание эта система получила 20 мая 1875 года, когда была подписана Метрическая конвенция.

Выбор единиц измерения не диктуется объективными обстоятельствами, а осуществляется по соглашению. Если допустить произвол в их выборе, то результаты измерений окажутся не сопоставимыми между собой. Для обеспечения единства измерений государства законодательно устанавливают системы единиц.

Общие правила построения системы единиц измерений (сокращенно, *единиц*) сформулировал К. Гаусс в 1832 году:

- выбирают основные величины;
- устанавливают единицы для основных величин. Выбор величины, принимаемой за единицу, является произвольным, и

определяется исключительно соображениями удобства её использования;

-определения и наименования единиц измерения для основных величин закрепляют законодательно;

-устанавливают единицы для производных величин.

Деление величин на основные и производные от основных величин базируется на следующих определениях.

*Основная величина* - величина условно принятая независимой от других величин в данной системе.

*Производная величина* – величина, входящая в систему величин и определяемая через основные величины этой системы.

Совокупность величин и уравнений связи между ними, образованную в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины условно принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин, называют *системой величин*.

Система величин, основанная на подмножестве семи основных величин: длина, масса, время, сила электрического тока, термодинамическая температура, количество вещества и сила света, является *Международной системой величин*.

В системах величин основным величинам присваивают условные буквенные обозначения, например, длине – L, массе – M, времени – T и т.д. Взаимосвязь производной величины Q с основными величинами записывают в виде формулы, правую часть которой называют *размерностью величины*:

$$\dim Q = L^{\alpha} \cdot M^{\beta} \cdot T^{\gamma} \dots$$

*Размерность величины* - выражение зависимости величины от основных величин системы величин, представленное в виде произведения символов, соответствующих основным величинам, в различных степенях ( $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ ), в котором численные коэффициенты опущены.

Размерность величины, по сути, - это качественная характеристика величины.

Очевидно, что для основной величины размерностью является принятое для неё буквенное обозначение, например:  $\dim L = L$ .

Понятие размерности широко используют:

-для перевода единиц измерения из одной системы единиц в другую систему единиц;

-для проверки правильности формул, полученных в результате теоретического вывода;

-для выяснения зависимости между величинами;

-в теории физического подобия.

Методы решения перечисленных задач излагаются в теории подобия и размерностей.

**Пример 1.** Записать размерность мощности  $P$ .

Используем формулу для определения мощности через силу  $F$  и скорость  $V$

$$P=F \cdot V.$$

Представим силу в виде произведения массы  $m$  на ускорение  $a$  –  $F=ma$ , а ускорение в свою очередь выразим через расстояние. Для равноускоренного движения –  $a=2 \cdot S/t^2$ . Сделаем подстановку

$$P=m \cdot a \cdot V=m \cdot (2 \cdot S/t^2) \cdot (S/t)=2 \cdot m \cdot S^2/t^3$$

Заменяя обозначения основных величин в формуле на их размерности и опустив коэффициент пропорциональности, запишем уравнение размерности

$$\dim P=M \cdot L^2 \cdot T^{-3}.$$

По указанным принципам в 19 и 20 веках были разработаны системы единиц для различных областей измерений СГС, СГСЭ, СГСМ, МТС, МКС, МКГСС. С целью унификации единиц в 1960 году XI Генеральной конференцией по мерам и весам была принята система единиц, которая носит название Международной (сокращенно СИ и SI). В России с 1982 года СИ стала обязательной для применения. Приоритет Международной системы подтвержден Законом РФ «Об обеспечении единства измерений».

В настоящее время широко применяются две системы единиц СИ и СГС. Система СГС существует более 100 лет и до сих пор используется в точных науках – физике и астрономии.

Международная система включает 7 основных единиц (таблица 1).

*Определения основных единиц в Международной системе.*

*Метр* есть единица длины, равная длине пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени равный  $1/299792458$  секунды.

*Килограмм* есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.

Таблица 1. Основные единицы СИ.

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			Международное	Русское
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электрич. тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая температура	$\Theta$	кельвин	K	К
Сила света	J	канделла	cd	кд
Количество вещества	N	моль	mol	моль

*Секунда* есть единица времени, равная времени 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

*Ампер* есть единица силы электрического тока, равная силе не изменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метр один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

*Кельвин* есть единица термодинамической температуры, равная  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды.

*Кандела* есть единица силы света, равная силе света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683$  ватт на стерadian.

*Моль* есть единица количества вещества, равная количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. Структурные элементы могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или группами частиц.

При образовании единиц для производных величин (таблица 2) используют законы физики или определения этих величин, устанавливающие взаимосвязь производной величины с основными величинами или другими производными величинами.



Таблица 2. Примеры производных единиц СИ, наименования и обозначения которых образованы с использованием наименований и обозначений основных единиц СИ.

Величина		Единица измерения		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			Международное	русское
Площадь	$L^2$	квадратный метр	$m^2$	$м^2$
Объем, вместимость	$L^3$	кубический метр	$m^3$	$м^3$
Скорость	$LT^{-1}$	метр в секунду	$m/s$	$м/с$
Ускорение	$LT^{-2}$	метр на секунду в квадрате	$m/s^2$	$м/с^2$
Волновое число	$L^{-1}$	метр в минус первой степени	$m^{-1}$	$м^{-1}$
Плотность	$L^{-3}M$	килограмм на кубический метр	$kg/m^3$	$кг/м^3$
Удельный объем	$L^3M^{-1}$	кубический метр на килограмм	$m^3/kg$	$м^3/кг$
Плотность электрического тока	$L^{-2}I$	ампер на квадратный метр	$A/m^2$	$А/м^2$
Напряженность магнитного поля	$L^{-1}I$	ампер на метр	$A/m$	$А/м$
Молярная концентрация компонента	$L^{-3}N$	моль на кубический метр	$mol/m^3$	$моль/м^3$
Яркость	$L^{-2}J$	кандела на квадратный метр	$cd/m^2$	$кд/м^2$

Пусть взаимосвязь производной величины с основными величинами выражается размерностью

$$\dim Q = L^\alpha \cdot M^\beta \cdot T^\gamma$$

Заменим обозначения размерностей основных величин на обозначения единицы измерения СИ. В результате получим единицу измерения производной величины

$$[Q] = m^\alpha \cdot \text{kg}^\beta \cdot s^\gamma.$$

**Пример 2.** Определить производную единицу для напряжения электрического тока через мощность и силу тока.

Взаимосвязь между указанными величинами выражается формулой

$$U = P/I.$$

Запишем размерность напряжения

$$\dim U = \dim P \cdot I^{-1}$$

Размерность мощности согласно таблице 3:  $\dim P = L^2MT^{-3}$ . Тогда

$$\dim U = L^2MT^{-3} \cdot I^{-1}$$

Подставляя единицы измерения, получим

$$[U] = 1 \text{ В} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}.$$

Среди производных единиц 22 имеют специальные названия (таблица 3), в том числе именованные - образованные от фамилий ученых, внесших весомый вклад в науку. Обозначения именованных единиц пишут с прописной буквы.

Единицы, принятые в Международной системе, на практике не всегда удобны: или слишком велики или очень малы. Для преодоления этого недостатка используют *кратные и дольные единицы*, образуемые умножением исходной единицы на число 10 возведенное в положительную или отрицательную степени.

Единицу измерений в целое число раз превышающую основную или производную единицу называют *кратной*. Например, единица длины километр равна  $10^3$  м, то есть является кратной метру.

*Дольная* единица – единица в целое число раз меньшая основной или производной единицы. Так дольной единицей является миллиметр, который в  $10^{-3}$  меньше метра. Приставки СИ для образования кратных и дольных единиц приведены в табл. 4.

Таблица 3. Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования

Величина		Единица			
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение		Выражение через осн. единицы СИ
			СИ	Рус.	
Плоский угол	1	радиан	rad	рад	$m \cdot m^{-1} = 1$
Телесный угол	1	стерадиан	sr	ср	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
Частота	$T^{-1}$	герц	Hz	Гц	$s^{-1}$
Сила	$LM T^{-2}$	ньютон	N	Н	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Давление	$L^{-1} M T^{-2}$	паскаль	Pa	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	$L^2 M T^{-2}$	джоуль	J	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Мощность	$L^2 M T^{-3}$	ватт	W	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Электрический заряд, количество электричества	TI	кулон	C	Кл	$s \cdot A$
Электрич. напряжение, электродвижущая сила	$L^2 M T^{-3} I^{-1}$	вольт	V	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая емкость	$L^{-2} M^{-1} T^4 I^2$	фарад	F	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2 M T^{-3} I^{-2}$	ом	$\Omega$	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2} M^{-1} T^3 I^2$	сименс	S	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Магнитный поток	$L^2 M T^{-2} I^{-1}$	вебер	Wb	Вб	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнитная индукция	$M T^{-2} I^{-1}$	тесла	T	Тл	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность	$L^2 M T^{-2} I^{-2}$	генри	H	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Температура Цельсия	$\Theta$	градус Цельсия	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	K
Световой поток	J	люмен	lm	лм	cd·sr
Освещенность	$L^{-2} J$	люкс	lx	лк	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
Активность радионуклида	$T^{-1}$	беккерель	Bq	Бк	$s^{-1}$
Поглощенная доза ионизирующего излучения	$L^2 T^{-2}$	грей	Gy	Гр	$m^2 \cdot s^{-2}$
Доза ионизирующего излучения	$L^2 T^{-2}$	зиверт	Sv	Зв	$m^2 \cdot s^{-2}$
Активность катализатора	$N T^{-1}$	катал	kat	кат	$mol \cdot s^{-1}$

Таблица 4. Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение приставки		Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		Международное	Русское			Международное	Русское
$10^{24}$	иотта	Y	И	$10^{-24}$	иокто	y	и
$10^{21}$	зетта	Z	З	$10^{-21}$	зепто	z	з
$10^{18}$	экса	E	Э	$10^{-18}$	атто	a	а
$10^{15}$	пета	P	П	$10^{-15}$	фемто	f	ф
$10^{12}$	тера	T	Т	$10^{-12}$	пико	p	п
$10^9$	гига	G	Г	$10^{-9}$	нано	n	н
$10^6$	мега	M	М	$10^{-6}$	микро	$\mu$	мк
$10^3$	кило	k	к	$10^{-3}$	милли	m	м
$10^2$	гекто	h	г	$10^{-2}$	санти	c	с
$10^1$	дека	da	да	$10^{-1}$	деци	d	д

Некоторые кратные и дольные единицы образуются не по десятичному принципу. Например, единицы времени, применяемые наравне с единицами СИ: 1 мин = 60 с; 1 ч = 60 мин = 3600 с.

Объединение единиц измерений в системы единиц породило использование понятий «системные единицы» и «внесистемные единицы», а обязательное использование системы СИ в законодательном порядке привело к появлению «внесистемных единиц допускаемых к применению наравне с единицами СИ» (тонна – единица массы, литр – единица вместимости, световой год – единица расстояния в астрономии, гектар – единица площади в сельском хозяйстве, обороты в минуту, миллиметр ртутного столба, калория и др.).

Наименования единиц, допускаемых к применению в Российской Федерации, их обозначения, правила написания, а также правила их применения устанавливаются Правительством Российской Федерации (Постановление Правительства РФ № 879 от 31 октября 2009 г.

«Положение о единицах величин, допускаемых к применению на территории Российской Федерации», оформленное в виде метрологических правил ПР 50.2.102 - 09).

**Правила написания единиц измерений.** При написании значений величин применяются обозначения единиц измерений буквами или специальными знаками. Допустимы два вида буквенных обозначений - международное обозначение единиц и русское обозначение единиц. В правовых актах используют только русские обозначения, в других случаях можно применять как русские, так и международные обозначения. Одновременное применение русских и международных обозначений возможно только в случаях, связанных с разъяснением применения таких единиц.

Буквенные обозначения единиц измерений печатают *прямым шрифтом*. В обозначениях единиц измерения точка не ставится.

Обозначения единиц измерений помещают за числовыми значениями величин в одной строке с ними (без переноса на следующую строку). Между числовым значением и обозначением единицы измерения ставят пробел. Исключения составляют обозначения единиц в виде знака, размещенного над строкой, перед которым пробел отсутствует (пример,  $30^{\circ} 15'$ ). Числовое значение, представляющее собой дробь с косой чертой, стоящее перед обозначением единицы измерения, заключают в скобки. Пример,  $(2 \frac{1}{4}) \text{ Н}$ .

При указании значений величин с предельными отклонениями числовые значения и их предельные отклонения заключают в скобки, а обозначения единиц измерений помещают за скобками (пример,  $(50 \pm 1) \text{ Гц}$ ), или обозначения единиц измерений ставят и за числовым значением величины, и за ее предельным отклонением (пример,  $50 \text{ Гц} \pm 1 \text{ Гц}$ ).

Не допускается указание единиц измерений в одной строке с формулами, выражающими зависимости между величинами или между их числовыми значениями, представленными в буквенной форме. (Неправильно:  $V=S/t$ , м/с.) Единицы измерений в таких случаях следует приводить в пояснениях обозначений величин к формулам.

Буквенные обозначения единиц измерений, входящих в произведение единиц, отделяют точкой на средней линии ("·"). Не допускается использование для обозначения произведения единиц измерений символа "х". (Пример. Правильно -  $120 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , неправильно –  $120 \text{ Нхм}$ ). Допускается отделение буквенных обозначений единиц, входящих в произведение, пробелами.

В буквенных обозначениях отношений единиц измерений в качестве знака деления используется только одна косая или горизонтальная черта. При этом произведение обозначений единиц в знаменателе заключают в скобки. Пример,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Допускается применение буквенного обозначения единицы измерения в виде произведения обозначений единиц, возведенных в степень (положительную или отрицательную). Пример,  $\text{кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ . Если для одной из единиц измерений, входящих в отношение, установлено буквенное обозначение в виде отрицательной степени, косая или горизонтальная черта не применяется.

При указании диапазона числовых значений величины, выраженного в одних и тех же единицах, обозначение единицы измерения указывают за последним числовым значением диапазона. Пример,  $30\dots 50 \text{ кВт}$ .

Наименования десятичных кратных и дольных единиц исходной единицы, возведенной в степень, образуют путем присоединения приставки к наименованию исходной единицы.

При написании наименований и обозначений десятичных кратных и дольных единиц СИ, образованных с помощью приставок, приставка или ее обозначение пишется слитно (пример, мегаватт) с наименованием или обозначением единицы. Если единица образована как произведение или отношение единиц, приставку или ее обозначение присоединяют к наименованию или обозначению первой единицы, входящей в произведение или в отношение. (Пример, правильно:  $\text{кПа}\cdot\text{с}/\text{м}$ ; неправильно:  $\text{Па}\cdot\text{кс}/\text{м}$ .) Допускается присоединение приставки ко второму множителю произведения или к знаменателю в случаях, когда такие единицы широко распространены. К наименованию и обозначению исходной единицы не присоединяют 2 или более приставки одновременно.

Например, вместо наименования единицы микромикрофард следует писать пикофард.

Обозначения десятичных кратных и дольных единиц исходной единицы, возведенных в степень, образуют добавлением соответствующего показателя степени к обозначению десятичной кратной или дольной единицы исходной единицы. При этом показатель степени означает возведение в степень десятичной кратной или дольной единицы вместе с приставкой.

#### 1.4. Погрешности и неопределенности измерений

*Погрешность измерений* есть отклонение измеренного значения величины  $X$  от истинного значения величины  $X_{и}$

$$\Delta = X - X_{и}. \quad (2)$$

Источниками погрешностей могут быть средства измерений, объекты измерений, оператор, выполняющий измерения, а также выбранный способ их взаимодействия и внешние факторы, влияющие на них.

Уравнение (2) содержит две неизвестные величины  $\Delta$  и  $X_{и}$  и не может быть использовано.

При экспериментальной оценке погрешностей методов и средств измерений, субъективной погрешности, достоверности методик выполнения измерений значение **погрешности** определяют как разность между измеренным значением величины  $X$  и опорным значением  $X_0$  величины.

$$\Delta = X - X_0. \quad (3)$$

Опорное значение величины, согласно [5], это значение, установленное одним из следующих способов:

-теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах;

-приписанное или аттестованное значение, базирующееся на экспериментальных работах какой-либо национальной или международной организации;

-согласованное или аттестованное значение, базирующееся на совместных или экспериментальных работах под руководством научной или инженерной группы;

-математическое ожидание, то есть среднее значение заданной совокупности результатов измерений.

Погрешность измерения, найденную по формуле (3) и выраженную в тех же единицах, что и измеряемая величина, называют **абсолютной погрешностью**.

Для характеристики точности измерений более удобна оценка погрешности, представленная в виде отношения

$$\Delta / X = \delta \quad (4)$$

и называемая **относительной погрешностью**.

**Пример 3.** Выполняются измерения напряжения в электрической сети и после трансформатора. Напряжение в сети 220 В, абсолютная погрешность измерения  $\Delta_{Uc} = 1,5$  В ; напряжение после трансформатора 24 В, абсолютная погрешность измерения  $\Delta_{Ut} = 0,2$  В. При сравнении абсолютных погрешностей более точными являются измерения напряжения после трансформатора. Определим относительные погрешности

$$\delta_{Uc} = 1,5/220 = 0,0068 \quad \text{и} \quad \delta_{Ut} = 0,2/24 = 0,0083.$$

Оценка относительных погрешностей показывает, что более точными являются измерения напряжения в электрической сети.

*В зависимости от причины возникновения различают инструментальные, методические, субъективные погрешности измерений, а также погрешности обусловленные отклонением значений влияющих факторов от нормальных значений. Таким образом погрешность измерений можно представить в виде суммы четырех составляющих*

$$\Delta = \Delta_{СИ} + \Delta_M + \Delta_{Л} + \Delta_{УСЛ}. \quad (5)$$

*Инструментальная погрешность  $\Delta_{СИ}$  определяется метрологическими свойствами применяемых средств измерений, обусловленными их конструктивными особенностями, чувствительностью к внешним воздействиям, погрешностями изготовления и износом в эксплуатации и т.д.*

*Методические погрешности  $\Delta_M$  возникают вследствие несовершенства принятого метода измерений.*



*Субъективные (личные) погрешности*  $\Delta_{\text{л}}$  вызываются индивидуальными особенностями и психико–физическим состоянием оператора, несовершенством органов чувств, эргономическими свойствами средств измерений и рабочего места.

Символом  $\Delta_{\text{УСЛ}}$  обозначена составляющая погрешности измерений, возникающая из-за *отличия условий измерения от нормальных* условий и их влияния на объект измерений и на средство измерений. В дальнейшем это слагаемое отдельно не рассматривается: влияние условий измерения на средство измерений учитывается в слагаемом  $\Delta_{\text{СИ}}$ , а влияние на объект измерения – в методической составляющей погрешности.

### ***Типичные составляющие погрешностей измерения.***

#### *Инструментальные составляющие:*

1. Погрешности, обусловленные несовершенством конструкции и технологического процесса изготовления средств измерений.
2. Статические погрешности средств измерений, вызываемые медленно меняющимися внешними влияющими величинами.
3. Динамические погрешности средств измерений (обусловленные инерционными свойствами средств измерений).
4. Погрешности преобразования и передачи измерительной информации.
5. Погрешности, появляющиеся вследствие износа или старения средств измерений.

#### *Методические составляющие погрешности измерений:*

1. Неполное определение измеряемой величины (например, в исходных условиях измерения массы древесины не указана её влажность);
2. Несовершенную реализацию определения измеряемой величины (например, фактическое место отбора пробы выхлопных газов автомобиля не соответствует заданному месту).
3. Нерепрезентативную выборку измерений (недостаточное число отсчетов при выполнении многократного измерения).
4. Не полное знание влияния окружающей среды на измерения, или несовершенное измерение параметров окружающей среды.
5. Неточные значения, приписанные эталонам, используемым для измерения, и стандартным образцам и материалам.

6. Неточные значения констант и других параметров, полученных из внешних источников и используемых в алгоритме обработке данных.

7. Аппроксимации и предположения, используемые в методе измерения и измерительной процедуре.

8. Погрешность из-за эффектов квантования (для цифровых средств измерения; в случаях, когда показатели процесса измеряются через определенные промежутки времени).

9. Отличие алгоритма вычислений от функции, строго связывающей результаты наблюдений с измеряемой величиной (теоретические погрешности).

10. Погрешности взаимодействия средства измерений и объекта измерений или средств измерений между собой

11. Несовершенное знание или отсутствие информации о законах распределения составляющих погрешности/неопределенности измерений.

12. Приблизительность вычисления точечных характеристик законов распределения ввиду ограниченного объема выборки.

(К числу методических погрешностей ГОСТ 8.563 и некоторые авторы книг по метрологии, например [7], относят «неадекватность контролируемому объекту модели, параметры которой принимаются в качестве измеряемых величин». Имеются в виду, например, погрешность определения площади поршня несовершенной формы по одному измеренному значению диаметра или погрешности, связанные с отбором проб. Однако такие погрешности не являются проблемой метрологии – это допущения/ошибки в постановке задачи или в её реализации).

#### *Погрешности, вносимые оператором.*

1. Погрешности считывания значений измеряемой величины со шкал и диаграмм (измерение штангенциркулем, планиметром, инструментальным микроскопом – совмещение изображений осей и поверхностей).

2. Погрешности обработки диаграмм без применения технических средств (при усреднении, суммировании значений).

3. Погрешности вызванные воздействием оператора на объект и средство измерений (искажение температурного поля, неправильная установка средства измерений, механическое и электромагнитное воздействие).

При анализе погрешностей измерений одной и той же величины, выполненных с одинаковой тщательностью и при неизменных условиях, было установлено, что погрешность

измерения может быть представлена в виде алгебраической суммы постоянной и переменной составляющих. Постоянную составляющую назвали *систематической* погрешностью, а переменную – *случайной* погрешностью. В метрологии приняты следующие определения этих составляющих погрешности измерения.

***Систематическая погрешность измерения*** – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной для данного ряда измерений или закономерно (предсказуемо) изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

Если систематическая погрешность возникает в результате известного эффекта влияющей величины на результат измерений, называемого систематическим эффектом, то можно определить её значение и, если оно значительно по сравнению с требуемой точностью измерения, то можно внести поправку или поправочный коэффициент для компенсации этого эффекта.

Систематические погрешности могут быть компенсированы частично или полностью выбором методики измерений (см. раздел 2.5), юстировкой (регулировкой) средств измерений, созданием условий для измерений.

Для выявления систематической погрешности измерительные приборы и системы настраивают или калибруют/градуируют с использованием эталонов и эталонных образцов. Однако значения величин, воспроизводимые этими эталонами и образцами, характеризуются погрешностью (неопределенностью), которая должна приниматься во внимание.

Таким образом, отличительной особенностью систематических погрешностей является то, что *они могут быть выявлены и исключены* из результатов измерений путем введения поправок. Это обстоятельство обуславливает применение терминов «неисправленное значение величины» (без учета поправки) и «исправленное значение величины» (с учтенной поправкой).

***Случайная погрешность*** – составляющая погрешности измерений, изменяющаяся *непредсказуемым образом* (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же величины. В появлении таких погрешностей не наблюдается каких-либо

закономерностей, они обнаруживаются при повторных измерениях одной и той же величины в виде некоторого разброса результатов. Случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда присутствуют. Они предположительно возникают из-за непредсказуемых или стохастических временных и пространственных изменений влияющих величин. Эффекты таких изменений называют случайными эффектами. Однако, несмотря на то, что применительно к конкретному результату измерения точное значение случайной погрешности указать нельзя, с помощью аппарата теории вероятностей и математической статистики можно установить границы, в пределах которых может находиться это значение с заданной вероятностью. Для характеристики случайных погрешностей используют закон распределения и его частные характеристики: математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, дисперсию, размах и другие.

Хотя случайная погрешность результата измерений не может быть компенсирована поправкой, оценку её значения можно уменьшить, увеличив число наблюдений.

Наибольшую опасность представляют невыявленные систематические погрешности, о существовании которых даже не подозревают. Именно они могут быть причиной неправильных научных выводов или ошибок при оценке качества продукции. Обнаружение и исключение систематических погрешностей является сложной задачей, требующей опыта и изобретательности экспериментатора. *Для конкретного средства измерений систематические погрешности могут быть определены при проверке или калибровке.*

В зависимости от характера проявления погрешностей кроме систематической и случайной погрешностей выделяют грубую погрешность или *промах*.

***Грубая погрешность*** – это случайная погрешность отдельного наблюдения, входящего в ряд наблюдений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Причинами таких погрешностей могут быть действия оператора (неверный отсчет, ошибка в записи, или в вычислениях) или кратковременные резкие изменения условий проведения измерений

(например, скачок напряжения в электрической цепи питания прибора). Методика выявления промахов и устранения систематических погрешностей измерения излагается в общей теории измерений. Некоторые сведения по этому вопросу изложены ниже.

*В зависимости от скорости изменения измеряемых величин во времени* погрешности измерения делят на статические и динамические погрешности.

*Статическая погрешность* – погрешность измерения постоянной величины.

*Динамическая погрешность* – погрешность измерения величины, меняющейся во времени, обусловленная несоответствием реакции средства измерения скорости изменения величины.

Экспериментальное определение погрешностей не всегда может быть реализовано по разным причинам и к тому же характеризуется приблизительностью оценки. Не менее приблизительная оценка погрешности может быть получена расчетным путем. Вследствие чего математическая операция  $X+\Delta$  не дает оснований утверждать, что результат суммирования будет точной оценкой значения величины. Это позволяет говорить о не полном соответствии, о не совершенном знании, о сомнении, о *неконкретности* результата измерения.

Неконкретность результата измерений, заключается в том, что истинное значение измеряемой величины определяется не одним числом, а границами интервала, в котором, предположительно, оно находится.

В настоящее время для характеристики точности результата измерений наряду с термином «погрешность измерения» применяют термин «неопределенность измерения».

*«Погрешность измерений»* и *«неопределенность измерений»* – это однородные понятия. Их взаимосвязь можно выразить так: неопределенность измерений – вероятностная оценка погрешности результата измерений, основанная на априорной информации о составляющих погрешностях измерений и результатах обработки многократных измерений.

Официальное определение [1,3] звучит так: **неопределенность измерений** - неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации.

Параметрами, характеризующими неопределенность результата измерений, являются: стандартная неопределенность, суммарная стандартная неопределенность, расширенная неопределенность.

*Стандартная неопределенность* - неопределенность результата измерения, выраженная в виде стандартного отклонения (т.е. среднеквадратического отклонения).

*Суммарная стандартная неопределенность* — стандартная неопределенность измерений, которую получают суммированием отдельных стандартных неопределенностей измерений, связанных с входными величинами в модели измерений.

*Расширенная (полная) неопределенность* – произведение суммарной стандартной неопределенности и коэффициента охвата, значение которого больше единицы.

Расширенная неопределенность определяет интервал вокруг оценки значения величины, в пределах которого, можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли быть приписаны измеряемой величине.

В составе неопределенности результата измерений погрешности, обусловленные систематическими эффектами, не рассматривают, если они могут быть определены и учтены введением поправки. Оставшиеся погрешности (неисключенные систематические и случайные) классифицируют как источники неопределенностей, оцениваемых по типу А и по типу В.

К группе (типу, категории) А относят составляющие неопределенности, значения которых определены путем статистического анализа результатов многократных измерений. Их называют «неопределенности, оцененные по типу А». Группу В образуют неопределенности, найденные с использованием других (не статистических) способов. Их называют «неопределенности, оцененные по типу В».

Очевидно, что эта классификация не связана с разделением погрешностей на случайные и систематические. Так неопределенность от внесения поправки на известный систематический эффект может быть получена в некоторых случаях как оценка по категории «А», в других случаях — как оценка по категории «В». Это положение может иметь место и для неопределенностей, характеризующих случайные эффекты.

Оба типа оценивания основаны на распределениях вероятностей, количественно характеризуемых дисперсией или стандартным отклонением.

### **1.5.Классификация измерений**

Измерения классифицируют по нескольким признакам. Рассмотрим те из них, которые имеют наибольшее значение.

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

При *однократном измерении* для получения значения величины отсчет показания средства измерений производят один раз. При большем значении последовательно выполненных отсчетов говорят о двукратном, трехкратном измерении и т.д.

*Многократное измерение* – измерение величины, при котором её значение определяют путем математической обработки совокупности последовательно выполненных отсчетов показаний средств измерений. Для того, чтобы можно было применить формулы математической статистики число отсчетов должно быть не меньше четырех. При этом устанавливают математическое ожидание (среднее арифметическое значение) - оценку значения величины и границы диапазона, в пределах которого с заданной вероятностью находится истинное значение измеряемой величины. Многократное измерение целесообразно, если при повторных отсчетах наблюдается вариация показаний средства измерений, и, главное, доминирующей является случайная составляющая погрешности измерений. Такие измерения выполняют при проведении научных экспериментов, они также характерны для деятельности метрологических учреждений, выполняющих

измерения максимально возможной точности и контрольно-поверочные измерения.

Для практической метрологии основными являются однократные измерения, обеспечивающие приемлемую точность, высокую производительность и низкую стоимость процесса.

**По характеристике точности** последовательно выполненных измерений различают равноточные и неравноточные измерения.

*Равноточные измерения* – ряд измерений величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях.

*Неравноточные измерения* – ряд измерений величины, выполненных различными по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

**По уровню точности результатов измерений** различают: измерения максимально возможной точности, контрольно-поверочные и технические.

Измерения *максимально возможной точности* применяют при воспроизведении единиц измерения и в научных исследованиях. *Контрольно-поверочными* называют измерения, выполняемые при контроле метрологических характеристик средств измерений в процессе их поверки или калибровки. Иногда авторы книг объединяют измерения максимально возможной точности и контрольно-поверочные в одну группу с названием метрологические измерения. *Технические измерения* – это как правило однократные измерения параметров технологических процессов, показателей качества продукции и т.д.

В отечественной метрологии также используют понятия ***абсолютные и относительные измерения***.

*Абсолютные измерения* – измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Если учесть, что основная величина это величина, входящая в систему величин (например, в СИ) и условно принятая независимой от других величин этой системы, то к абсолютным измерениям относятся



прямые измерения массы, длины, силы света, количества вещества и т.д.

*Относительными* называют измерения отношения одноименных величин или функций этого отношения. Так как соотносятся одноименные величины, в результате измерения будет получено безразмерное число - коэффициент. (Следует отметить слабость данной классификации, поскольку приведенному определению соответствуют любые измерения. В Международном словаре такое разделение измерений отсутствует).

***По изменению измеряемой величины во времени*** измерения делят на *статические* и *динамические* измерения. *Статическое измерение* - измерение величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную величину на протяжении времени измерений. К статическим измерениям относят измерения переменных величин, не являющихся функциями времени (например, измерение шероховатости поверхности, удельного расхода топлива в зависимости от мощности двигателя, кинематической погрешности зубчатой передачи от угла поворота). При *динамическом измерении* величина изменяется во времени (например: давление газов в цилиндре двигателя внутреннего сгорания) или меняются факторы, влияющие на оценку измеряемой величины. Скорость изменения величины следует учитывать при выборе метода и средств измерений для предотвращения появления или для уменьшения динамической составляющей погрешности измерения.

***По количеству одновременно измеряемых величин и способу использования результатов измерений*** различают прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения.

*Прямое измерение* – измерение, при котором оценку значения величины получают с отсчетного устройства средства измерений при однократном измерении или путем вычисления среднего арифметического значения (определения центра группирования) ряда наблюдений при многократном измерении.

*Косвенное измерение* – измерение одной или одновременные измерения нескольких однородных и/или неоднородных величин (однократные или многократные), оценки значений которых

используют для вычисления искомой величины, связанной с измеряемыми величинами (величиной) известной зависимостью.

*Совокупные измерения* – измерения нескольких однородных величин в различных сочетаниях, при которых значения каждой из них получают решением системы уравнений.

*Совместные измерения* – одновременные измерения нескольких неоднородных величин с целью установления зависимости между ними.

Если исходить из определения измерения приведенного ранее, то «косвенные», «совокупные» и «совместные» измерения измерениями не являются. Однако если рассматривать измерения еще и как определенным образом организованную процедуру, то применение этих терминов уместно.

В рекомендации МИ 2222-92 «ГСИ. Виды измерений. Классификация» выделены 11 *видов измерений*: геометрических величин; механических величин; параметров потока, расхода, уровня, объема веществ; давления и вакуумные; физико-химического состава и свойств веществ; теплофизические и температурные; времени и частоты; электрических и магнитных величин, радиотехнические и радиоэлектронные; акустических величин; оптико-физические; характеристик ионизирующих излучений и ядерных констант. Там же приведен список величин, наполняющих представленные виды измерений. Классификация предназначена для применения в нормативно-методических документах и справочно-информационных изданиях.

## **1.6. Измерительное преобразование. Измерительные сигналы**

В метрологии информацию о величине называют измерительной информацией, а величины, являющиеся носителями измерительной информации, - *измерительными сигналами*.

*Измерительный сигнал* - сигнал, содержащий информацию об измеряемой величине.

Первичным носителем измерительной информации, т.е. первичным измерительным сигналом, является измеряемая величина. Для получения результата измерения, обеспечения

удобства хранения, передачи, отображения и др. измерительный сигнал могут подвергаться преобразованиям, при которых изменяют параметры и вид сигнала (например, из аналогового сигнала в дискретный сигнал и наоборот) или производят замену величины, носителя измерительной информации, на величину другой природы. Например, силу заменяют перемещением или деформацией, температуру - изменением высоты столбика жидкости или электродвижущей силой и т.д. Эта процедура называется *измерительным преобразованием*.

Простейшее измерительное преобразование – это изменение масштаба сигнала измерительной информации находит применение в подавляющем большинстве измерительных приборов. Оно позволяет повысить чувствительность средства измерений и улучшить его метрологические характеристики, расширить или изменить диапазон измерения.

Наиболее часто встречающееся преобразование – представление сигнала измерительной информации в виде перемещения указателя (стрелки, светового пятна, самописца и пр.) измерительного прибора или в цифровой форме.

На пути от объекта измерения к показывающему или регистрирующему устройству средства измерений измерительный сигнал может подвергаться нескольким последовательным преобразованиям, которые разделяют на первичные и вторичные. (Первичное преобразование – это преобразование, при котором входным сигналом является измеряемая величина). Особую роль играют первичные преобразования, в рамках которых решается задача замены измеряемой величины на представительную величину. Под представительной величиной здесь понимается величина,

- которая может быть измерена,
- удобная для дальнейшего преобразования,
- средства измерений которой позволяют получить результат измерения с заданной точностью и в требуемой форме и др.,
- и, обязательно, для которой в рамках используемого физического явления или эффекта обеспечивается её однозначное соответствие измеряемой величине.

В этой связи отметим, что не все величины могут быть измерены непосредственно. Так, например, о температуре, давлении, силе, электрическом токе мы судим по эффектам, наблюдаемым при их действии на объекты. Воздействие температуры сопровождается тепловым расширением материалов. Действие силы или давления приводит к деформации тел. Взаимодействие проводника, через который идет ток, с магнитным полем порождает силу, действующую на проводник.

В зависимости от природы измеряемой величины и требований к представительной величине первичное преобразование может состоять из одной или нескольких ступеней. Например, механическая сила, действуя на упругий элемент, деформирует его. Вместе с упругим элементом растягивается/сжимается тензорезистор, изменяются его длина и площадь поперечного сечения и, как следствие, электрическое сопротивление. Изменение сопротивления в электрической цепи позволяет получить сигнал измерительной информации в виде изменения падения напряжения или силы тока. Однако на пути к отображению измерительной информации полученный сигнал подлежит дальнейшим преобразованиям.

*Измерительные сигналы (ИС)* могут характеризоваться несколькими параметрами, которые разделяют на информативные и неинформативные. Параметр сигнала, связанный с измеряемой величиной, называют информативным, а все остальные параметры – неинформативными параметрами.

*Измерительные сигналы* подразделяют по качественным и количественным признакам (рис.1).

*По характеру представления измерительной информации* ИС делят на аналоговые и дискретные сигналы.

Информативный параметр аналогового сигнала может принимать в определенных границах любые значения, дискретного сигнала – только некоторое конечное число значений. Цифровые ИС представляют собой частный случай дискретных сигналов, каждому значению которых поставлены в соответствие определенные комбинации символов некоторого алфавита (например, десятичной или двоичной системы).

По причинно-следственной связи измерительные сигналы делят на детерминированные и случайные.

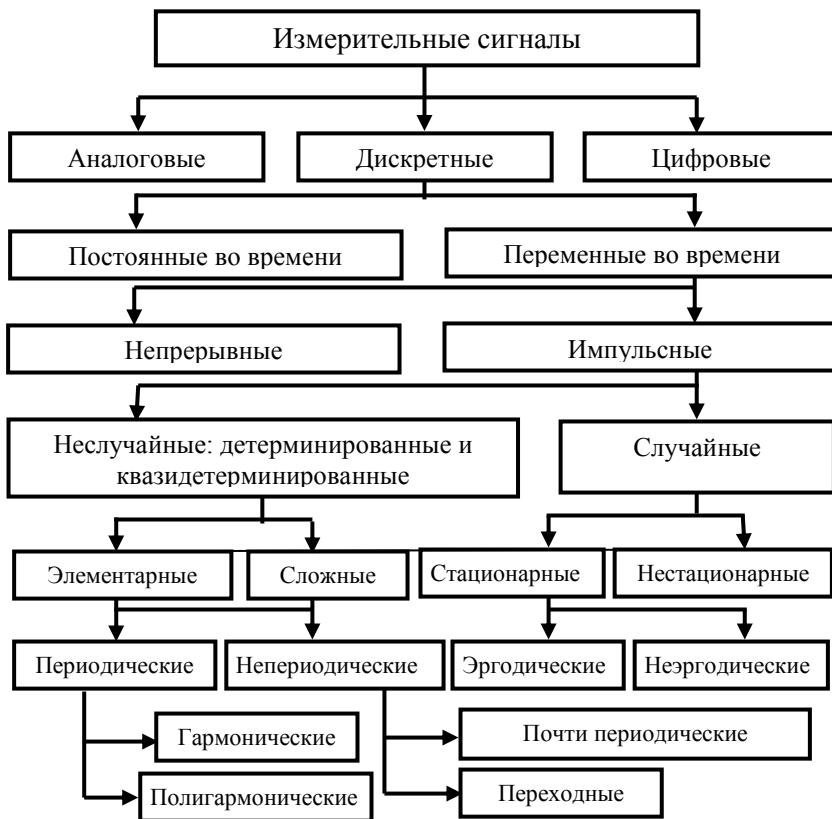


Рис.1. Классификация измерительных сигналов [6]

Детерминированные ИС характеризуются тем, что при повторении условий наблюдения они принимают одни и те же значения или одни и те же последовательности значений.

Случайные ИС наблюдаются при исследовании событий, которые за счет влияния ряда случайных факторов при повторении условий наблюдения наступают случайно в неопределенные моменты времени.

При измерительном преобразовании происходит приведение информативного параметра выходного сигнала в соответствие информативному параметру входного сигнала. Эту процедуру называют *модуляцией*, сигнал на входе преобразователя именуют модулирующим сигналом, а на выходе из преобразователя – модулированным сигналом. Модулированный сигнал получают перенесением измерительной информации на какой-либо стационарный сигнал, который именуют *модулируемым или несущим*. (В более узком смысле под *модуляцией* понимают наложение низкочастотного сигнала на высокочастотный сигнал.) Стационарные высокочастотные сигналы воспроизводят измерительные генераторы.

Необходимость модуляции сигналов обосновывается потребностями: передачи измерительной информации на большие расстояния без искажений, одновременной передачи нескольких сигналов по одному каналу, представления сигнала в виде, позволяющем выполнять его автоматическую обработку.

*Основными видами несущих сигналов являются:*

-сигналы постоянного уровня (постоянные электрические токи и напряжения, давление сжатого воздуха, световой поток, линейные и угловые размеры);

-синусоидальные сигналы (переменный электрический ток или напряжение);

-последовательность прямоугольных импульсов (электрических или световых).

*В зависимости от вида модуляции* измерительные сигналы классифицируют следующим образом.

*Сигналы постоянного уровня* - характеризуются лишь одним параметром и поэтому могут быть модулированы только по уровню.

*Синусоидальные сигналы* - могут быть модулированы по амплитуде, частоте или фазе. В зависимости от того, который из этих параметров сигнала является информативным, говорят об амплитудно-модулированных, частотно-модулированных или фазомодулированных сигналах (рис. 2-4).

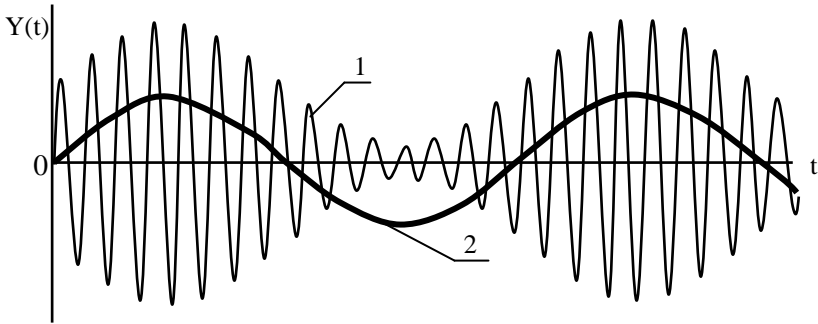


Рис.2. Амплитудно-модулированный сигнал –1 и модулирующий сигнал –2

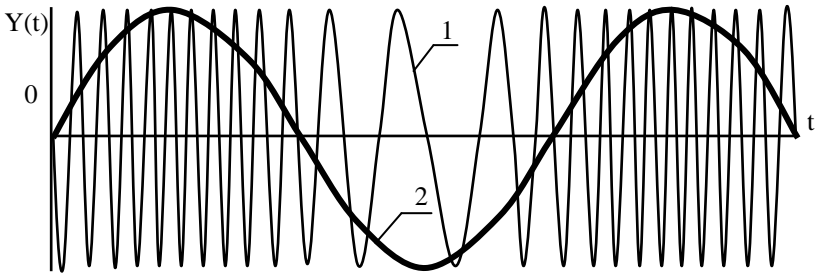


Рис.3. Частотно-модулированный –1 и моделирующий – 2 сигналы

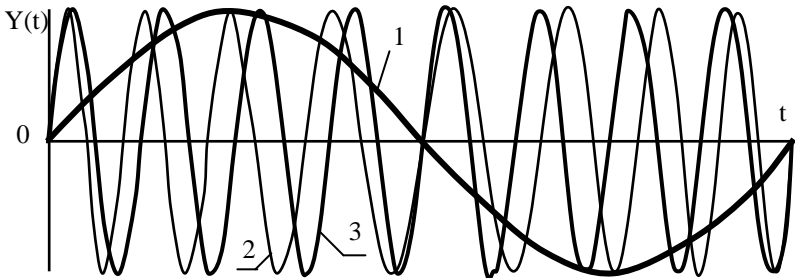


Рис.4. Модулирующий – 1, фазомодулированный - 2 и несущий (опорный, модулируемый) – 3 сигналы

Последовательность прямоугольных импульсов - может быть модулирована по амплитуде (амплитудно-импульсно-модулированные сигналы), по частоте (частотно-импульсно-модулированные сигналы), по фазе (фазоимпульсно-модулированные сигналы) или по ширине импульсов (широотно-импульсно-модулированные сигналы) – рис.5. Сигнал, в котором различным значениям измеряемой величины поставлена в соответствие определенная комбинация импульсов различного уровня, называется кодоимпульсным, или цифровым.

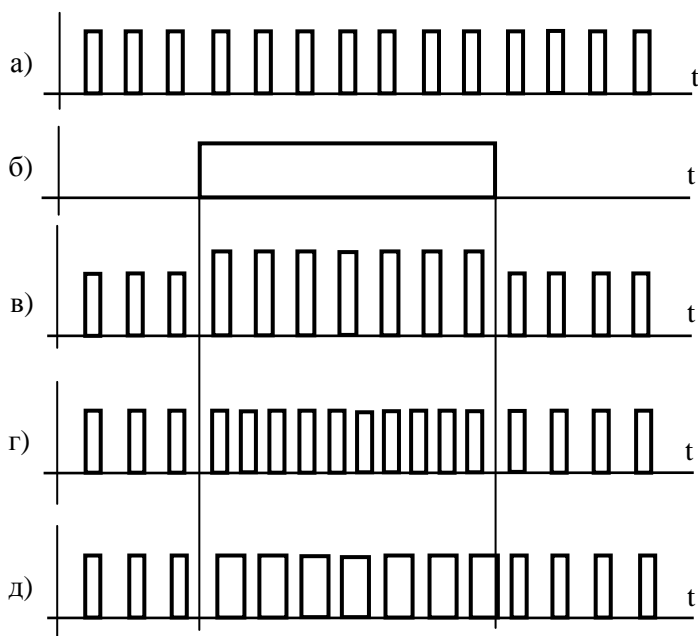


Рис.5. Импульсная модуляция. Сигналы: а) – несущий–последовательность прямоугольных импульсов; б) – модулирующий; в) – амплитудно–импульсно–модулированный; г) – частотно–импульсно–модулированный; д) – широкоотно–импульсно–модулированный

По отношению к измерительному преобразованию **величины** разделяют на *активные* и *пассивные*. *Активными* называют величины, для которых измерительное преобразование не требует



использования вспомогательных источников энергии (примеры, сила электрического тока и электрическое напряжение, механическая сила, температура). К *пассивным* относят величины, для которых получение измерительного сигнала возможно только при использовании постороннего источника энергии (примеры, масса, индуктивность, твердость, электрическое сопротивление).

Измерительное преобразование и измерительные сигналы находят применение при создании средств измерений и являются их важными характеристиками. При этом вся совокупность измерительных преобразований может быть реализована в одном измерительном приборе или в нескольких последовательно соединенных средствах измерений (датчик, измерительные преобразователи, измерительный прибор).

Следует иметь в виду, что при измерительных преобразованиях возможно искажение или потеря части измерительной информации, что отражается на погрешности средств измерений.

## **2. Технические основы обеспечения единства измерений**

### **2.1. Средства измерительной техники**

Говоря о техническом обеспечении измерений, следует различать термины «средства измерительной техники» и «средства измерений».

**Средства измерительной техники:** - обобщающее понятие, охватывающее технические средства, предназначенные для измерений.

**По функциональному назначению** средства измерительной техники разделяют [3] на средства измерений, эталоны, измерительные системы, измерительные установки, измерительные принадлежности, средства сравнения, стандартные образцы и др.

**Средствами измерений** называют технические устройства, предназначенные для измерений, для которых установлены значения нормируемых метрологических характеристик.

К средствам измерений относят [3] меры, измерительные преобразователи и измерительные приборы.

*Мера* (материальная) - средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с приписанными им значениями.

Меры разделяют на однозначные, многозначные, наборы мер, магазины мер, установочные.

Однозначная мера воспроизводит одно значение величины. Например, гиря 1 кг; плоскопараллельная концевая мера длины 70 мм; конденсатор постоянной емкости, резистор, нормальный элемент. К однозначным мерам относятся *стандартные образцы* состава и свойств веществ и материалов, в частности, образцы твердости, шероховатости, чистых металлов и сплавов, относительной диэлектрической проницаемости, для которых в результате испытаний установлены значения одной и более величин, характеризующих свойство или состав материала или вещества.

Для удобства применения однозначные меры могут поставяться в виде наборов и магазинов мер. В набор, состав которого обычно устанавливается нормативно-техническими документами, входит комплект мер воспроизводящих несколько значений одной и той же величины, которые при необходимости могут применяться как в отдельности, так и в различных сочетаниях. Магазин мер представляет собой единое устройство, в котором меры объединены конструктивно и имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (магазины электрических сопротивлений, индуктивностей).

Меры, воспроизводящие ряд значений величины, называют многозначными. К их числу относят штриховые меры длины (измерительные линейки), вариометр индуктивности, конденсатор переменной емкости.

На мере указывают номинальное значение величины, которое она воспроизводит (номинальное значение меры). *В зависимости от допуска на значение величины, установленного при изготовлении мер, им присваивают классы точности.* Меры, поделенные на классы, называют рабочими и используют при технических измерениях. При этом границы допуска рассматривают

как пределы погрешности (расширенной неопределенности) значения меры.

Для установления действительного значения меры её подвергают калибровке/аттестации. Погрешность определения действительного значения меры называют погрешностью калибровки меры. *В зависимости от погрешности калибровки (аттестации) меры подразделяют на **разряды** (1, 2, 3 и т.д. разряды).* Меры, которым присвоен тот или иной разряд, применяют для поверки средств измерений (в этом случае по метрологическому назначению они являются образцовыми мерами).

*Измерительный преобразователь* – это средство измерений или его часть, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки, хранения или индикации, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Измерительные преобразователи входят в состав измерительных приборов, установок и систем.

По месту в измерительной цепи различают первичные, передающие и промежуточные преобразователи. Первичный преобразователь – это преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая величина. Конструктивно обособленный первичный преобразователь называют датчиком (термопара, динамометрическая пружина, датчик давления или перемещения, шунт и т.п.).

Передающие преобразователи – преобразователи, на выходе которых образуются величины, удобные для регистрации и передачи на расстояние. Преобразователь может одновременно выполнять функции первичного и передающего преобразователей.

Промежуточный преобразователь – измерительный преобразователь, занимающий место после первичного преобразователя (измерительные преобразователи тока, усилители и т.п.).

*Основной характеристикой преобразователя является **функция преобразования**, определяемая как соотношение значений входной (преобразуемая величина) и выходной величин. Если в результате преобразования природа сигнала измерительной*

информации не изменяется, а функция преобразования линейная, то преобразователь называют масштабным или усилителем.

*Измерительный прибор* – средство измерения, предназначенное для преобразования сигнала измерительной информации к виду, доступному для восприятия и отсчета.

*Измерительный прибор* - средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия.

В зависимости от метода измерений, для которого предназначен измерительный прибор, различают приборы прямого действия (манометры, термометры, амперметры, тахометры и т.д.) и приборы сравнения (весы, индикаторная скоба, электрические компенсаторы и т.д.).

Если конструкция отсчетного устройства прибора позволяет считывать измерительную информацию, соответствующую любому значению величины в пределах диапазона показаний, то измерительный прибор называют аналоговым (осциллограф, ртутный термометр, манометр, индикатор часового типа и др.). В случае, если информация на отсчетном устройстве отображается в виде дискретных значений, прибор называют цифровым (цифровой вольтметр, измерительный микроскоп с цифровым отсчетом и т.п.). Шкала аналогового прибора является шкалой измерений в явном виде. У цифрового прибора шкала измерений в явном виде отсутствует, хотя и хранится им.

Регистрирующие измерительные приборы позволяют записывать измерительную информацию на бумажный носитель, магнитный диск или перфоленту, фото пленку или фотобумагу. К ним в частности относятся: локомотивные скоростемеры, автоматические потенциометры для регистрации изменения температуры, профилографы для оценки шероховатости поверхности, шлейфовые осциллографы. Регистрирующий прибор, в котором предусмотрена запись показаний в форме диаграммы, называют самопишущим. Печатающий измерительный прибор регистрирует информацию в цифровой форме. Большинство измерительных приборов допускают только отсчитывание показаний значений измеряемой величины и называются

показывающими. Дополнительными функциональными возможностями обладают суммирующие и интегрирующие измерительные приборы.

Для классификации измерительных приборов используют физические принципы, реализованные в приборах для получения или для преобразования измерительной информации. Физический принцип, положенный в основу прибора называют принципом действия прибора.

В соответствии с решаемыми задачами меры, измерительные преобразователи и измерительные приборы могут объединяться в измерительные установки и системы.

*Измерительная установка* (измерительный стенд) представляет собой совокупность функционально объединенных и расположенных в одном месте мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких величин.

*Измерительная система* – совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту

Измерительные системы являются развитыми измерительными устройствами, в состав которых дополнительно включена ЭВМ для автоматической обработки результатов измерений. Измерительные системы используются в информационных, управляющих и контролирующих системах. Измерительную систему, перенастраиваемую в зависимости от изменения измерительной задачи, называют гибкой измерительной системой.

***Стандартный образец*** - материал, достаточно однородный и стабильный в отношении определенных свойств, подготовленный для того, чтобы использовать его при измерении или при оценивании номинальных свойств.

(«Номинальное свойство - свойство материального объекта или явления, которое не может быть выражено количественно».)

Особую роль в метрологии выполняют эталоны. Согласно РМГ 29-2013, ***«эталон (единицы величины или шкалы измерений)*** -

средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы измерений». В качестве эталонов используют меры, измерительные установки, называемые в этом случае эталонными установками, стандартные образцы, в варианте исполнения, характеризуемом наивысшей точностью воспроизведения величин с приписанными им значениями (не всегда это единицы измерений) и особыми условиями применения.

Наиболее известными являются эталоны единиц: длины – метра, массы – килограмма. Менее известны эталоны единиц давления, времени, силы электрического тока, температуры, индуктивности и других единиц измерения.

Для реализации измерений необходимы также **измерительные принадлежности** - вспомогательные средства, служащие для обеспечения необходимых условий выполнения измерений с требуемой точностью. Они призваны защитить средства или объект измерений от воздействия влияющих факторов, создать условия для применения средств измерений.

К измерительным принадлежностям относят, например, термостаты; барокамеры; противовибрационные фундаменты; устройства, экранирующие влияние электромагнитных полей; тренога для установки прибора по уровню; струбины и боковики для работы с плоскопараллельными концевыми мерами длины и др.

Классификация средств измерительной техники **по метрологическому назначению** обусловлена их местом и ролью в иерархической структуре соподчинения при обеспечении единства измерений.

Эталоны по подчиненности подразделяют на первичные (исходные) и вторичные (подчиненные).

**Первичные эталоны** воспроизводят единицы измерений и величины с установленными для них значениями с наивысшей точностью, достижимой в данной области измерений. Как правило, они имеют статус национальных (Государственных) эталонов.

Национальные эталоны содержат и применяют Государственные научные метрологические институты.

**Вторичные эталоны** (эталон-копии и рабочие эталоны) - эталоны, значения которых устанавливают по первичным эталонам.

Эталон-копии создают в необходимых случаях для обеспечения сохранности первичных эталонов, и заменяют их при сличении с рабочими эталонами.

Рабочие эталоны – вторичные эталоны, используемые для поверки/калибровки образцовых и наиболее точных рабочих средств измерений.

Совокупность государственных первичных и вторичных эталонов, являющуюся основой обеспечения единства измерений в стране, называют эталонной базой страны.

Средства измерений *по метрологическому назначению* делят на образцовые и рабочие.

**Образцовые средства измерений** - меры, измерительные приборы и измерительные преобразователи, целенаправленно используемые (самостоятельно или в составе эталонных или поверочных установок) для поверки/калибровки других средств измерений.

В зависимости от уровня метрологических характеристик **образцовым средствам измерений** присваивают разряды 1, 2, 3 и т.д. (в порядке уменьшения точности).

(В РМГ 29-2013 термин «образцовое средство измерений» ошибочно заменен на термин «рабочий эталон». Ни по определению, ни по функциональным возможностям измерительные приборы и измерительные преобразователи не могут быть названы эталонами).

**Рабочие средства** измерений предназначены для измерений, не связанных с контролем метрологических характеристик других средств измерений. К рабочим относят средства измерений показателей качества изделий, параметров технологических процессов и окружающей среды, результатов спортсменов, в медицинских целях, при осуществлении торговых операций и др.

В зависимости от условий применения рабочие средства измерений делят на следующие группы:

-лабораторные (используются в научных исследованиях, в медицине, в производственных лабораториях);

-производственные (применяются для обеспечения и контроля заданных характеристик технологических процессов, для контроля качества продукции, при ремонте технических устройств);

-полевые средства измерений (устанавливаются на транспортных средствах, буровых установках, передвижных электростанциях).

В зависимости от варианта использования в процессе измерений рабочие средства измерений делят на основные и вспомогательные.

**Основное средство измерений** – средство измерений величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей.

**Вспомогательное средство измерений** – средство измерений величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерения необходимо учитывать для получения результата измерений. Показания вспомогательных средств измерений используют для вычисления поправок к результатам измерений или для поддержания влияющих величин в заданных пределах.

## 2.2. Структурные элементы средств измерений.

Средства измерений состоят из некоторого числа так называемых структурных элементов, каждый из которых выполняет одну из функций, связанных с измерением. К таким функциям относятся: восприятие сигнала и его преобразование по форме или виду энергии; гашение колебаний; защита от помехонесущих полей; отображение информации; регистрация выходных сигналов и другие.

Совокупность структурных элементов средств измерений, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной величины от входа до выхода, называют измерительной цепью или каналом.

Общими для средств измерений структурными элементами являются:

*измерительное устройство* - часть измерительного прибора (установки или системы), связанная с измерительным сигналом и



имеющая обособленную конструкцию и назначение. Например, измерительным устройством может быть названо регистрирующее устройство измерительного прибора (включающее ленту для записи, лентопротяжный механизм и пишущий элемент), измерительный преобразователь;

*чувствительный элемент* – элемент средства измерений или измерительной системы, на который непосредственно воздействует измерительный сигнал;

*измерительный наконечник* (для контактных средств измерений) – элемент в измерительной цепи, находящийся в контакте с объектом измерения в контрольной точке под непосредственным воздействием измеряемой величины;

*преобразовательный элемент* – элемент средства измерений, в котором происходит одно из ряда последовательных преобразований измерительного сигнала;

*измерительный механизм* – совокупность структурных элементов средства измерений, обеспечивающих необходимое перемещение указателя (стрелки, светового пятна, поверхности жидкости и т.д.);

*показывающее устройство* - совокупность элементов средства измерений, которые обеспечивают визуальное восприятие измерительной информации;

*указатель* - часть показывающего устройства, положение которой относительно отметок шкалы определяет показания средства измерений;

*регистрирующее устройство* – часть измерительного прибора, предназначенная для регистрации показаний.

Показывающее устройство средства измерений может быть выполнено в виде цифрового табло, экрана или в виде шкалы с указателем.

*Шкала* - часть показывающего измерительного прибора, представляющая собой упорядоченный набор отметок вместе с соответствующими значениями величины. Отметки на шкалах могут быть нанесены равномерно или неравномерно. В связи с этим шкалы называют равномерными или неравномерными.

### 2.3. Метрологические характеристики средств измерений

Метрологические характеристики средств измерений – это показатели качества средств измерений, обуславливающие их пригодность (применимость) для измерений. Они являются составной частью исходной информации, предназначенной:

-для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений или стандартных неопределенностей результата измерений;

-для расчета метрологических характеристик каналов измерительных систем;

-для выбора средств измерений;

-для использования при контроле средств измерений на соответствие установленным нормам.

Различают *нормируемые метрологические характеристики*, требования к которым установлены нормативными документами, и *ненормируемые*.

В соответствии с ГОСТ 8.009 нормируемые метрологические характеристики средств измерений делят на следующие группы:

- характеристики, предназначенные для определения результатов измерений (без введения поправки);
- характеристики погрешностей средств измерений;
- характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам;
- динамические характеристики средств измерений;
- метрологические характеристики влияния на погрешность;
- неинформативные параметры выходного сигнала.

*К первой группе* характеристик относят: функцию преобразования измерительного преобразователя или измерительного прибора; значение однозначной или значения многозначной меры; цену деления шкалы измерительного прибора или многозначной меры; вид выходного кода, число разрядов кода, цену единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом виде.

*Функция преобразования* есть зависимость информативного параметра выходного сигнала от информативного параметра входного сигнала. При этом под информативным параметром входного сигнала понимается параметр сигнала, функционально связанный с измеряемой величиной (для вторичных преобразователей) или являющийся самой измеряемой величиной (для первичных преобразователей). Например, зависимость деформации динамометрической пружины от приложенной к ней нагрузки. Функция преобразования может быть представлена в виде формулы, графика, таблицы.

*Цена деления шкалы* – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений. Для цифровых средств измерений аналогом цены деления шкалы, в частном случае, может быть цена единицы наименьшего разряда. В других случаях указанное соответствие будет определяться числом разрядов на табло и видом выходного кода, т.е. формой представления числа (с фиксированной или плавающей запятой).

*Характеристики погрешности средств измерений* могут быть представлены в виде полной погрешности или её составляющих.

*Характеристики систематической составляющей погрешности* средств измерений выбирают из числа следующих:

- 1) значение систематической составляющей  $\Delta_s$ ;
- 2) значение систематической составляющей  $\Delta_s$  и, дополнительно, математическое ожидание  $M[\Delta_s]$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma[\Delta_s]$  систематической составляющей погрешности (для отдельного средства измерений систематическая составляющая есть постоянная величина, но для множества средств измерений конкретного типа она является погрешностью изготовления и рассматривается как случайная величина).

*Характеристики случайной составляющей погрешности* средств измерений могут быть представлены в виде:

- 1) среднеквадратического отклонения  $\sigma[\Delta^0]$  случайной составляющей погрешности;

2) среднеквадратического отклонения случайной составляющей погрешности  $\Delta$  и, дополнительно, нормализованной автокорреляционной функции  $r_{\Delta}(\tau)$  или функции спектральной плотности  $S_{\Delta}(\omega)$  случайной составляющей погрешности.

Характеристики случайной составляющей  $\Delta_H^o$  погрешности гистерезиса представляют вариацией  $H$  выходного сигнала (показания) средства измерения. (Вариация показаний измерительного прибора - разность показаний прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.) Погрешность гистерезиса обусловлена отличием показаний данного экземпляра измерительного прибора при различной скорости и направлении изменения информативного параметра входного сигнала.

Если в качестве характеристики средства измерения выбирается *суммарная погрешность*, указывают значение погрешности.

**Характеристики чувствительности средств измерений к влияющим факторам** (третья группа) выражаются функцией влияния  $\varphi(\xi)$ , представляющей зависимость изменения метрологической характеристики средства измерения от изменения влияющей величины (например, изменения погрешности измерения давления тензодатчиком от температуры), или изменением значений метрологических характеристик, вызванных изменениями влияющих величин  $\xi$  в установленных пределах.

В случае, если изменение влияющей величины существенно отражается на изменении погрешности средства измерения, метрологические характеристики нормируют для нормальных условий применения. При этом характеристики погрешности называют **характеристиками основной погрешности** средства измерения, а составляющую погрешности, возникающую вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от ее

нормального значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области называют *дополнительной погрешностью*.

*Пример* задания основной и дополнительной погрешностей в паспорте аналогово–цифрового преобразователя Ф4222.

Основная погрешность, % -  $\pm[0,6+0,5 (X_k/X - 1)]$ .

Дополнительная погрешность, %:

- при отклонении температуры окружающего воздуха от  $(20\pm 5)^\circ\text{C}$  на каждые  $10^\circ\text{C}$  в пределах  $(+5 \dots + 50)^\circ\text{C} \dots\dots\dots \pm 0,5$

- при изменении напряжения питания в пределах  $(+10\dots-15)$  % и частоты на  $\pm 2$  % относительно номинальных значений  $\dots\dots\dots \pm 1,0$

- от влияния внешнего переменного магнитного поля частотой 50 Гц, напряженностью 4000 А/м  $\dots\dots\dots \pm 1,0$

Отметим, что приведенная характеристика дополнительной погрешности от температуры является, по сути, описанием линейной функции.

При незначительных дополнительных погрешностях допускается нормировать метрологические характеристики для рабочих условий.

*Четвертую группу метрологических характеристик* приходится учитывать при динамических измерениях, когда становятся важными инерционные свойства средства измерений.

Если на вход средства измерений подается нестационарный, переменный сигнал измерительной информации выходной сигнал прибора будет нести «запоздалую» (из-за инерционных задержек в механизме прибора) и искаженную (из-за динамических погрешностей) информацию об измеряемой величине. Если такие «задержки» для средства измерений велики, то их нецелесообразно применять для измерения быстроменяющихся величин.

Характеристики инерционных свойств средств измерений называют динамическими характеристиками. В их состав могут входить *полная динамическая характеристика и частные динамические характеристики*.

Полная динамическая характеристика аналоговых, а также аналогово-цифровых средств измерений, время реакции которых больше интервала между двумя измерениями, может быть представлена в виде: переходной характеристики; импульсной

переходной характеристики; амплитудно-фазовой характеристики; амплитудно-частотной характеристики; совокупности амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик; передаточной функции.

К частным динамическим характеристикам относят любые функционалы или параметры полных динамических характеристик: время реакции, коэффициент демпфирования, постоянная времени, значение резонансной собственной круговой частоты, погрешность датирования отсчета, максимальная частота (скорость) измерений.

Нормирование тех или иных характеристик погрешности производится в зависимости от свойств средства измерений. При этом к обозначению нормируемой метрологической характеристики, в частности, добавляются следующие индексы:  $o$  – для характеристик основной погрешности;  $dyn$  – для характеристик динамической погрешности;  $sf$  – для номинального значения характеристики;  $p$  – для предела допускаемого значения характеристики, для обозначения дополнительной погрешности используют индекс  $c$  (см. пример 4).

Формулы для вычисления погрешности средства измерений по нормируемым в соответствии с ГОСТ 8.009 метрологическим характеристикам (с учетом основной, дополнительной и динамической составляющих), известным характеристикам влияющих величин и входного сигнала приведены в РД 50-453-84 «Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета» [2].

В указанном документе речь идет о двух методах расчета.

**Первый метод** – вероятностный с уровнем доверия к оценке суммарной погрешности  $P < 1$ .

Математические ожидания основной систематической погрешности и дополнительных погрешностей суммируют алгебраически

$$M(\Delta_{СИ}) = M(\Delta_{ос}) + \sum_{j=1}^n M[\varphi_{s,sf}(\xi_j)] \quad (6)$$

и, затем, учитывают в результате измерения введением поправки.

Дисперсию вычисляют по формуле

$$D(\Delta_{\text{СИ}}) = \sigma^2(\Delta_{\text{ос}}) + \sum_{j=1}^n D[\varphi_{s, sf}(\xi_j)] + \left\{ \sigma_p(\Delta_0^0) + \sum_{j=1}^n \varphi_{\sigma, sf}(\xi_j) \right\}^2 + \frac{1}{12} \left\{ H_{\text{оп}} + \sum_{j=1}^n \varphi_{H, sfm}(\xi_j) \right\}^2 + \frac{\mu_{sf}^2}{12} + D(\Delta_{\text{dyn}}) \quad (7)$$

Предпоследнее слагаемое в формуле (где  $\mu_{sf}$  – номинальная цена единицы наименьшего разряда кода цифрового измерительного прибора или аналого-цифрового преобразователя) для аналоговых приборов равно нулю.

Параметры, подставляемые в правую часть формулы (7), берут из технической характеристики средства измерений.

В соответствии с концепцией Руководства [5] характеристики погрешностей, заданные в виде среднеквадратических отклонений, должны рассматриваться как стандартные неопределенности типа В. Если характеристики указаны в виде предельных значений, неопределенности типа В вычисляют в предположении закона равной вероятности (если не установлено другое).

Используя принятое обозначение стандартной неопределенности -  $u_B$ , формулу (7) можно записать так

$$u_{B, \text{СИ}}^2 = u_{B, S}^2 + \sum_{j=1}^n u_{B, \xi_j}^2 + \left\{ u_{B, \sigma} + \sum_{j=1}^n u_{B, \sigma}(\xi_j) \right\}^2 + \left\{ u_{B, H} + \sum_{j=1}^n u_{B, H}(\xi_j) \right\}^2 + u_B^2(\mu) + u_{B, \text{dyn}}^2 \quad (8)$$

При вычислении  $u_{B, \sigma}(\xi_j)$  и  $u_{B, H}(\xi_j)$  подставляют значения влияющих величин в заданном диапазоне их изменения, при которых результат вычисления по формуле будет максимальным.

Границы погрешности  $\Delta(P)$  или расширенной неопределенности  $U(P)$  вычисляют по формулам:

$$\Delta(P) = \pm Z_{P/2} \cdot \sqrt{D(\Delta_{\text{СИ}})},$$

где  $Z_{P/2}$  – аргумент нормированной функции Лапласа, равной  $P/2$ . При доверительной вероятности  $P = 0,95$   $Z_{0,95/2}$  принимают равным 2, при  $P = 0,99$   $Z_{0,99/2} = 2,6$ ;

$$U(P) = k_o \cdot u_{в,си} ,$$

где  $k_o$  - коэффициент охвата (коэффициент, используемый как множитель суммарной неопределенности для получения расширенной неопределенности). Если нет других соображений, значение коэффициента охвата для доверительной вероятности  $P = 0,95$  считают равным 2, для доверительной вероятности  $P = 0,99$  - равным 3.

**Второй метод** основан на алгебраическом суммировании наибольших возможных значений составляющих погрешностей, что позволяет вычислить предел погрешности средства измерения. Такой подход дает завышенную оценку погрешности средства измерений и его применение требует обоснования.

**Пример 4.** Рассчитать характеристики погрешности аналогового средства измерений мгновенных значений напряжения [2].

Исходные данные – нормируемые метрологические характеристики:

-предел систематической составляющей основной погрешности  $\Delta_{osp} = 10$  мВ;

-предел допускаемого среднеквадратического отклонения случайной составляющей основной погрешности  $\sigma_p (\Delta^o_o) = 5$  мВ;

-предел допускаемой вариации при нормальных условиях  $H_{op} = 6$  мВ;

-номинальная функция влияния температуры на систематическую составляющую погрешности, мВ:

$$\varphi_{s,sf}(t) = 0,5 \cdot (t - 20^\circ);$$

-номинальная функция влияния напряжения питания на систематическую составляющую погрешности, мВ:

$$\varphi_{s,sf}(U) = 0,4 \cdot (U - 220);$$

-номинальная функция влияния температуры на среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности, мВ:

$$\varphi_{\sigma,sf}(t) = 0,1 \cdot (t - 20^\circ);$$

-номинальная функция влияния напряжения питания на среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности, мВ:

$$\varphi_{\sigma,sf}(U) = 0,1 \cdot (U - 220);$$

Здесь  $t = 20^\circ$  и  $U = 220$  В – нормальные значения влияющих величин.

Значения влияющих величин в реальных условия измерения: температура  $t = 30^\circ \pm 5^\circ$ ; напряжение  $U = (215 \pm 15)$  В.



Для величин, заданных интервальными оценками, принимаем равномерный закон распределения.

Математическое ожидание систематической составляющей основной погрешности не задано и, следовательно, равно нулю:  $M(\Delta_{os})=0$ .

Математическое ожидание систематической составляющей погрешности от действия влияющих величин

$$M_{max} [\varphi_{s,sf}(t)] = M[0,5 \cdot (t_{max} - 20^{\circ})] = 0,5 \cdot (35^{\circ} - 20^{\circ}) = 7,5 \text{ мВ};$$

$$M_{max} [\varphi_{s,sf}(U)] = M[0,4 \cdot (U_{max} - 220)] = 0,4 \cdot (230 - 220) = 4 \text{ мВ};$$

$$M_{min} [\varphi_{s,sf}(t)] = M[0,5 \cdot (t_{min} - 20^{\circ})] = 0,5 \cdot (25^{\circ} - 20^{\circ}) = 2,5 \text{ мВ};$$

$$M_{min} [\varphi_{s,sf}(U)] = M[0,4 \cdot (U_{min} - 220)] = 0,4 \cdot (200 - 220) = -8 \text{ мВ};$$

Математическое ожидание систематической составляющей погрешности средства измерений будет равно

$$M(\Delta_{СИ}) = M(\Delta_{os}) + M[\varphi_{s,sf}(t)] + M[\varphi_{s,sf}(U)]$$

Значение  $M(\Delta_{СИ})$  учитывается в результате измерений в виде поправки (со знаком минус). Для этого при измерениях необходимо контролировать значения влияющих величин, а зависимость поправок от температуры и напряжения целесообразно представить в виде графиков или справочных таблиц.

Находим *составляющие суммарной дисперсии* (стандартные неопределенности типа В).

1. Для основной систематической составляющей погрешности

$$u_{B,s}^2 = \sigma^2(\Delta_{osp}) = \Delta_{osp}^2/3 = 10^2/3 = 33,3 \text{ мВ}^2;$$

2. Дисперсия дополнительных погрешностей будет зависеть от точности измерения влияющих величин. Примем в данной задаче, что пределы погрешности измерения температуры составляют  $\Delta_t = \pm 1^{\circ}$ , напряжения  $\Delta_U = \pm 5 \text{ В}$ , и распределение погрешностей по закону равной вероятности. Среднеквадратические отклонения будут равны:  $\sigma_t = \Delta_t/\sqrt{3}$  и  $\sigma_U = \Delta_U/\sqrt{3}$ .

Делаем подстановку:

$$u_{B,t}^2 = D[\varphi_{s,sf}(t)] = [\partial \varphi_{s,sf}(t)/\partial t]^2 \cdot \sigma_t^2 = 0,5^2 \cdot (\Delta_t/\sqrt{3})^2 = 0,25 \cdot (1/\sqrt{3})^2 = 0,08 \text{ мВ}^2;$$

$$u_{B,U}^2 = D[\varphi_{s,sf}(U)] = [\partial \varphi_{s,sf}(U)/\partial U]^2 \cdot \sigma_U^2 = 0,4^2 \cdot (\Delta_U/\sqrt{3})^2 = 0,16 \cdot (5/\sqrt{3})^2 = 1,3 \text{ мВ}^2.$$

3. Для случайной составляющей основной погрешности с учетом влияющих величин

$$u_{B,\Sigma}^2 = \left\{ u_{B,\sigma} + \sum_{j=1}^n u_{B,\sigma}(\xi_j) \right\}^2 = \left\{ \sigma_p(\Delta_0^0) + \sum_{j=1}^n \varphi_{\sigma,sf}(\xi_j) \right\}^2$$

$$= \left\{ \sigma_p(\Delta_0^0) + \varphi_{\sigma,sf}(t) + \varphi_{\sigma,sf}(U) \right\}^2$$

$$u_{B,\Sigma}^2 = \left\{ \sigma_p(\Delta_0^0) + 0,1 \cdot (t - 20^{\circ}) + 0,1 \cdot (U - 220) \right\}^2$$

$$u_{B,\Sigma}^2 = \{5 + 0,1 \cdot (35^0 - 20^0) + 0,1 \cdot (230 - 220)\}^2 = 56,2 \text{ мВ}^2$$

4. Для допускаемой вариации

$$u_{B,H}^2 = \sigma^2(H_{op}) = H_{op}^2 / 12 = 6^2 / 12 = 3 \text{ мВ}^2.$$

5. Вычисляем суммарную дисперсию по формуле (8)

$$u_{B,СИ}^2 = u_{B,S}^2 + u_{B,t}^2 + u_{B,U}^2 + u_{B,\Sigma}^2 + u_{B,H}^2 = \\ = 33,3 + 0,08 + 1,3 + 56,2 + 3 = 94 \text{ мВ}^2$$

6. Расширенная неопределенность при вероятности  $P=0,95$  ( $k_o = 2$ )

$$U(P) = k_o \cdot u_{B,СИ} = 2 \cdot \sqrt{94} = 19,4 \text{ мВ}$$

**Пятую группу** метрологических характеристик составляют *характеристики средств измерений, отражающие их способность влиять на инструментальную составляющую погрешности измерений вследствие взаимодействия средств измерений с любым из подключенных к их входу или выходу компонентов (таких как объект измерений, другое средство измерений и т.п.).* Такие характеристики называют импедансными характеристиками или импедансами. Они отражают обмен энергией между средством измерения и подключенными к их входу или выходу объектами. (Пример. Измерение температуры термометром или термопарой, расхода жидкостей и газов расходомерами. Импедансом может быть внутреннее трение в упругих элементах при их деформации, трение в опорах.)

**Неинформативные параметры выходного сигнала** (шестая группа характеристик) не являются, строго говоря, метрологическими характеристиками, так как не несут информации о значении измеряемой величины. Однако они влияют на нормальную работу средств измерений и должны быть ограничены. Так нормальная работа частотомера обусловлена постоянством амплитуды и формы сигнала измерительной информации; характеристики стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов зависят от количества примесей, структуры материала и др.

Метрологические характеристики могут быть заданы числом, функцией, в табличной и графической форме. При этом в большинстве случаев указывают номинальное значение параметра (функции) и (или) его граничные значения, пределы допускаемых изменений.

Для выбора и оценки качества средств измерений кроме вышеназванных имеют значение следующие характеристики: диапазон показаний, диапазон измерений, измерительное усилие, чувствительность, стабильность, быстродействие, допустимые условия применения, помехозащищенность, надежность, потребляемая мощность, ремонтпригодность и др. Приведем определения некоторых из них.

*Диапазон показаний* – это область значений величины, ограниченная начальной и конечной отметками шкалы средства измерений.

*Диапазон измерений* – область значений величины, для которой указаны значения показателей точности средства измерений. Значения величины, ограничивающие диапазон измерений называются пределами измерений. Диапазон измерений может быть больше, меньше и, в частном случае, равен диапазону показаний.

Измерительные приборы бывают контактные, у которых чувствительный элемент – измерительный наконечник соприкасается с измеряемым объектом, и бесконтактные (механический контакт отсутствует). В первом случае важной характеристикой является *измерительное усилие*, т.е. сила воздействия измерительного наконечника на измеряемый объект.

*Чувствительность* средства измерений определяется отношением изменения  $\Delta I$  выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению  $\Delta x$  измеряемой величины.

*Стабильность средства измерений* – качественная характеристика средства измерений, отражающая неизменность во времени его метрологических характеристик. Понятием родственным стабильности является метрологическая надежность средства измерений.

*Метрологическая надежность средства измерений* – способность средства измерений сохранять метрологическую исправность. При этом под метрологической исправностью понимают состояние средства измерений, при котором все его нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям.

## 2.4. Классы точности средств измерений

В зависимости от уровня метрологических характеристик отдельным видам средств измерений присваивают классы точности.

**Класс точности** - классификационная характеристика средств измерений или измерительных систем, обусловленная значением предела допустимой погрешности средства измерений.

**Предел допустимой погрешности средства измерений** - наибольшее значение погрешности средства измерений, устанавливаемое нормативным документом, при котором оно признается годным к применению.

Обозначение класса точности позволяет ранжировать средства измерений одного типа по уровню нормируемых метрологических характеристик, а, в некоторых случаях, является показателем, позволяющим вычислить предел допустимой погрешности средства измерений. Это важно иметь в виду при выборе средств измерений в зависимости от заданной точности измерений.

Общие требования к классам точности установлены ГОСТ 8.401. Указанный стандарт **не распространяется** на средства измерений, для которых в стандартах предусмотрены нормы отдельно для систематической и случайной составляющих погрешности или при применении которых необходимо для оценки погрешности измерений учитывать динамические характеристики.

Конкретные требования к метрологическим характеристикам, в совокупности отражающие уровень точности средств измерений для каждого класса точности, регламентируются в стандартах на средства измерений отдельного вида.

Классы точности средства измерений присваивают по результатам испытаний с целью утверждения типа. При этом оценивают соответствие средств измерений установленным требованиям по каждой нормируемой метрологической характеристике.

Метрологические характеристики испытываемых средств измерений могут быть выражены в формах абсолютной погрешности, приведенной погрешности или относительной погрешности.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливают по формуле

$$\Delta = \pm a \quad (9)$$

или

$$\Delta = \pm(a+b \cdot x), \quad (10)$$

где

$\Delta$  - пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, выраженной в единицах, принятых для измеряемой величины на входе (выходе), или условно в делениях шкалы;

$x$  - значение измеряемой величины на входе (выходе) средств измерений или число делений, отсчитанных по шкале;

$a, b$  - положительные числа, не зависящие от значения  $x$ .

В обоснованных случаях пределы допускаемой абсолютной погрешности устанавливают по более сложной формуле или в виде графика либо таблицы.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности устанавливают по формуле

$$\gamma = \pm (\Delta / X_N) \cdot 100\% = \pm p, \quad (11)$$

где  $\gamma$  - пределы допускаемой приведенной основной погрешности, %;

$\Delta$  - пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, устанавливаемые по формуле (9);

$X_N$  - нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и  $\Delta$ ;

$p$  - отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда  $1 \cdot 10^n; 1,5 \cdot 10^n; 2 \cdot 10^n; 2,5 \cdot 10^n; 4 \cdot 10^n; 5 \cdot 10^n; 6 \cdot 10^n$ ; ( $n=1, 0, -1, -2, -3$  и т. д.)

Нормирующее значение принимается по определенным правилам в зависимости от типа шкалы отсчетного устройства измерительного прибора. Нормирующее значение  $X_N$  для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, а также для измерительных преобразователей, если нулевое значение входного (выходного) сигнала находится на краю или вне диапазона измерений, устанавливают равным большему из пределов измерений или равным большему из модулей пределов

измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений.

Для электроизмерительных приборов с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений нормирующее значение может быть установлено равным сумме модулей пределов измерений.

Для средств измерений, в конструкции которых использована шкала с условным нулем, нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений (см. пример 5).

Для средств измерений с установленным номинальным значением нормирующее значение устанавливают равным этому номинальному значению.

Для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой нормирующее значение устанавливают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины.

*Пределы допускаемой относительной основной погрешности* устанавливают по формуле

$$\delta = \Delta / X = \pm q, \quad (12)$$

если  $\Delta$  установлено по формуле (9), или по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm \left[ c + d \cdot \left( \left| \frac{X_k}{x} \right| - 1 \right) \right], \quad (13)$$

где  $q$  -отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда, приведенного выше;

$X_k$  - больший (по модулю) из пределов измерений;

$c$  ,  $d$  - положительные числа, выбираемые из ряда, приведенного ранее:  $c=b+d$ ;  $d = a // X_k |$  .

В обоснованных случаях пределы допускаемой основной погрешности устанавливают по более сложной формуле или в виде графика либо таблицы.

Пределы допускаемых дополнительных погрешностей устанавливают:

-в виде постоянного значения для всей рабочей области влияющей величины или в виде постоянных значений по интервалам рабочей области влияющей величины;

-путем указания отношения предела допускаемой дополнительной погрешности, соответствующей регламентированному интервалу влияющей величины, к этому интервалу;

-путем указания зависимости предела допускаемой дополнительной погрешности от влияющей величины (предельной функции влияния);

-путем указания функциональной зависимости пределов допускаемых отклонений от номинальной функции влияния.

Пределы допускаемой дополнительной погрешности, как правило, устанавливаются в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой основной погрешности.

Для различных условий эксплуатации средств измерений в рамках одного и того же класса точности допускается устанавливать различные рабочие области влияющих величин.

**Обозначение классов точности.** В технической документации для обозначения классов точности средств измерений используют прописные буквы латинского алфавита, римские цифры и арабские числа. Классам точности, которым соответствуют меньшие пределы допускаемых погрешностей средств измерений, присваивают буквенные обозначения, находящиеся ближе к началу алфавита, или римские цифры, означающие меньшие числа.

Использование того или иного варианта условного обозначения класса точности зависит от способов задания пределов допускаемой основной погрешности, предусмотренных ГОСТ 8.401.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности принято выражать в форме абсолютных погрешностей или относительных погрешностей, причем последние установлены в виде графика, таблицы или формулы, классы точности обозначают прописными буквами латинского алфавита или римскими цифрами. В необходимых случаях к обозначению класса точности буквами латинского алфавита добавляют индексы в виде арабской цифры.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме приведенной погрешности или относительной погрешности в соответствии с

формулой (12), классы точности обозначают числами, которые равны этим пределам, выраженным в процентах.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме относительных погрешностей в соответствии с формулой (13), классы точности обозначают числами с и d , разделяя их косой чертой.

Обозначения классов точности наносят на щитки, циферблаты и корпуса средств измерений с добавлением, в некоторых случаях, специальных знаков (см. таблицу 5).

В соответствии с ГОСТ 8.401 обозначение класса точности допускается не наносить на высокоточные меры, а также на средства измерений, для которых действующими стандартами установлены особые внешние признаки, зависящие от класса точности, например параллелепипедная или шестигранная форма гирь общего назначения.

Рядом с условным обозначением класса точности указывают обозначение стандарта или технических условий, устанавливающих технические требования к этим средствам измерения. Здесь же могут быть приведены обозначения условий эксплуатации средств измерений, если для них установлены различные рабочие области влияющих величин.

Средству измерений с двумя и более диапазонами измерений одной и той же величины (например, омметр), может быть присвоено два и более класса точности.

Ниже приведены примеры практического использования обозначений классов точности.

**Пример 5.** Милливольтметр термоэлектрического термометра класса точности 0,5 с пределами показаний от 200<sup>°C</sup> до 600<sup>°C</sup>, показывает 300<sup>°C</sup>. Определить предел допускаемой погрешности прибора.

1. Класс точности термометра определяется приведённой погрешностью. Шкала равномерная с условным нулём. Поэтому нормирующее значение будет равно

$$X_N = t_{\text{ук max}} - t_{\text{ук min}} = 600 - 200 = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Вычисляем предел допускаемой погрешности термометра. Из условия  $\gamma = \Delta \cdot 100\% / X_N$  найдем



$$\Delta = \frac{\gamma \cdot x_N}{100} = \frac{0,5 \cdot 400}{100} = 2^\circ\text{C}$$

3. Запишем результат измерения  $t = (300 \pm 2)^\circ\text{C}$

Таблица 5.

Форма выражения погрешности	Форма представления предела допускаемой основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности (примеры)	
			В документации	На средстве измерения
приведенная	$\gamma = \Delta/X_N = \pm p$	$\gamma = \pm 1,5$	Класс точности 1,5	1,5
приведенная (при существенно неравномерной шкале)	$\gamma = \Delta/X_N = \pm p$	$\gamma = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	0,5 ✓
относительная	$\delta = \Delta/X = \pm q$	$\delta = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	0,5
относительная	$\delta = \Delta/X = \pm [c + d \cdot ( X_k/x  - 1)]$	$\delta = \pm [0,02 + 0,01 \cdot ( X_k/x  - 1)]$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01
относительная	В виде графика или формулы		Класс точности С	С
абсолютная	$\Delta = \pm a$ $\Delta = \pm (a + b \cdot x)$		Класс точности М	М

**Пример 6.** Амперметр с пределом показаний  $I = (-10 \dots +25)$  А, класса точности 1, показывает 5А. Вычислить предел допускаемой погрешности прибора.

1. Шкала амперметра равномерная с нулем посередине. Для неё:

$$X_N = I_{\text{шк max}} - I_{\text{шк min}} = +25 - (-10) = +35 \text{ А}$$

2. Из формулы (11) найдем предел допускаемой погрешности

$$\Delta_1 = 1,0 \cdot 35 / 100 = \pm 0,35 \text{ А}$$

**Пример 7.** Амперметр класса точности 0,06/0,04 показывает 20 А. Пределы показаний по шкале:  $X_K = \pm 50$  А. Вычислить предел допускаемой относительной погрешности. Делая подстановку в формулу (13) получим

$$\delta = \pm \left[ c + d \left( \frac{|X_k|}{x} - 1 \right) \right] = \pm \left[ 0,06 + 0,04 \left( \frac{50}{20} - 1 \right) \right] = \pm 0,12\%$$

**Пример 8.** Выбрать более точное средство измерения напряжения 20 В, если на складе имеются два типоразмера вольтметров

1 –  $U_{\text{шкл max}} = 100 \text{ В}$  класс точности 0,5

2 –  $U_{\text{шкл max}} = 30 \text{ В}$  класс точности 1,5

Вычисляем пределы погрешностей вольтметров на основе формулы (11). Нормирующие значения в данном случае равны верхним отметкам шкал приборов. Получим

$$\Delta_1 = 0,5 \cdot 100 / 100 = 0,5 \text{ В}$$

$$\Delta_2 = 1,5 \cdot 30 / 100 = 0,45 \text{ В}$$

Для выполнения измерений принимаем более точное средство измерений под номером 2.

**Пример 9.** Определить требуемый класс точности миллиамперметра с верхним пределом показаний  $I_{\text{шкл max}} = 0,5 \text{ мА}$ , если допускаемое значение относительной погрешности измерений  $[\delta] = 1\%$ . Измеряемый ток характеризуется значениями от 0,1 до 0,5 мА.

1. Вычисляем допускаемое значение абсолютной погрешности, используя формулу (12). Тогда получим

$$[\Delta] = [\delta] \cdot I / 100\% = 1 \cdot 0,1 / 100 = 0,001 \text{ мА}$$

2. Находим допустимое значение приведенной погрешности:

$$\gamma = [\Delta] \cdot 100\% / X_N = 0,001 \cdot 100 / 0,5 = 0,2\%$$

Обозначение класса точности не должно выражаться числом более полученного. Ориентируясь на ряд чисел, приведенных на странице 61 принимаем миллиамперметр класса точности 0,2.

## 2.5. Методы измерений

В общем случае *метод* – способ практического осуществления чего-либо. В соответствии с этим определением, **методы измерений** представляют собой способы решения измерительной задачи, характеризующиеся приемами использования средств измерений и реализуемыми принципами измерений.

Под **принципом измерений** понимается физическое явление или эффект, положенный в основу измерений тем или иным типом средств измерений.

В зависимости от способа применения средства измерений различают два основных метода измерений: метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой.

*Метод непосредственной оценки* (прямое измерение) – метод измерений, при котором значение величины считывается с отсчетного устройства средства измерений без каких – либо дополнительных действий со стороны лица, проводящего измерения. Например, измерение давления манометром, частоты вращения тахометром, длины линейкой. Достоинствами этого метода являются простота отсчета, высокая производительность, быстрота получения результата измерений, возможность непосредственного наблюдения за изменением величины, не высокие требования к квалификации оператора.

*Метод сравнения с мерой* заключается в сравнении измеряемой величины с известной величиной, воспроизводимой мерой. Искомое значение получают алгебраическим суммированием значения меры и показания средства сравнения (компаратора), либо принимают равным значению меры. В первом случае метод сравнения с мерой называется дифференциальным, во втором – нулевым.

*Дифференциальный или разностный метод* (косвенное измерение) характеризуется измерением разности между значениями измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой. Примерами дифференциального метода являются измерение линейных размеров индикаторной скобой, оптиметром, миниметром, индикаторным нутромером, определение массы на обычных весах с использованием гирь, измерение смещения исходного контура в зубчатых колесах тангенциальным зубомером и т.д.

Если значение величины, воспроизводимое мерой, достаточно близко к значению измеряемой величины, то для измерения могут быть использованы приборы с небольшим диапазоном измерений, но с большой чувствительностью (большей разрешающей

способностью). Это положительно сказывается на точности измерений.

*Нулевой метод* (прямое измерение) – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на средство сравнения доводят до нуля. Нулевой метод используется при измерении массы на равноплечных весах, при измерении индуктивностей, сопротивлений, емкостей при помощи мостов. Точностные возможности данного метода определяются погрешностью мер и собственными погрешностями прибора сравнения.

К разновидностям метода сравнения с мерой относят методы измерения замещением и дополнением. В *методе измерения замещением* измеряемую величину замещают мерой. При этом, если добиваются однозначного показания прибора (не обязательно это нулевое показание), замещение будет полным и значение измеряемой величины равно значению меры. Если показание средства измерений изменилось, то замещение будет неполным, к значению меры следует прибавить разность показаний. Применительно к случаю измерения сопротивления с помощью моста сопротивлений метод измерения замещением будет выглядеть так. После постановки измеряемого сопротивления, фиксируется показание гальванометра (при этом оно может быть выставлено на нуль). Испытуемое сопротивление заменяется в электрической цепи магазином сопротивлений, с помощью которого добиваются отмеченного показания гальванометра и, затем, определяют значение искомого сопротивления, снимая отсчет с магазина сопротивлений. Несмотря на кажущееся усложнение данного метода по сравнению с нулевым методом, точность измерений значительно повышается вследствие того, что сравниваемые искомая и известная величины включаются в одну и ту же часть измерительной цепи прибора. Это позволяет исключить ряд погрешностей.

*Метод измерения дополнением* - метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина дополняется мерой этой же величины, чтобы добиться требуемого показания прибора сравнения.

По способу взаимодействия чувствительного элемента прибора с объектом измерения различают *контактный* и *бесконтактный* методы измерений. В первом случае присутствует в большей или меньшей мере возмущающее воздействие чувствительного элемента на объект измерений, что снижает точность результата.

В книгах по метрологии разделение методов измерений на методы непосредственной оценки и сравнения с мерой рассматривается как основная их классификация. Однако на практике вопрос о методе измерений, как правило, предполагает ответ, содержащий *описание физического явления или эффекта* (принципа измерения), реализуемого для получения представительной величины, или характеристику способа (способов) преобразования измерительного сигнала.

Конкретные реализации принципов измерения позволяют, например, говорить о методе теплового расширения (волнометрический метод) при измерении температуры, об электромеханическом методе измерения силы тока, о методе деформаций (тензометрии) при измерении силы, об аналоговом и цифровом методах.

В зависимости от области знаний, к которой относится представительная величина, выделяют электрические, оптические, пневматические и т.д. методы.

Как отмечено ранее, измерительное преобразование может быть многоступенчатым. Однако, характеризуя метод измерения, обычно ведут речь о физических явлениях или эффектах, положенных в основу первичного преобразования. Некоторые физические эффекты, используемые при измерительных преобразованиях и определяющие название метода измерений, приведены в таблице 6.

## **2.6. Качество измерений.**

Рассматривая измерения как процесс, а результаты измерений как продукцию, можно говорить о качестве измерений. Исходя из определения качества продукции в соответствии с ГОСТ 15467, дадим определение качества измерений.

Таблица . Физические эффекты, используемые для преобразования измеряемых величин.

Выходная величина	Входные величины					молекулярная
	механическая	тепловая	магнитная	электрическая	оптическая	
Механическая	Законы рычага. Упругость. Физический маятник.	Тепловое расширение. Давление Паров.	Силы, действующие в магнитном поле. Магнитострикция	Силы, действующие в электрическом поле. Электрострикция. Пьезоэлектрический эффект	Давление излучения. Радиометр.	Сорбция, десорбция, набухание, Электрофлорес.
Тепловая	Адиабатическое изменение состояния. Теплота трения	—	Вихревые токи	Джоулева теплота. Диелектрические потери тепла. Вихревые токи	Абсорбция + зависимость сопротивления от температуры. Т. э. д. с. или пьезоэлектрический эффект.	Удельная теплоемкость, теплопроводность.
Магнитная	Коллективные потоки Магнито - упругий эффект	Закон Кюри — Вейсса	Диа- пара- ферромагнетизм. Гистерезис (накопление).	Электромагнитные измерительные приборы. Силы, действующие в магнитном поле	Абсорбция + закон Кюри — Вейсса.	-
Электрическая	Индукция. Пьезорезистивный и пьезоэлектрический эффекты.	Зависимость сопротивления от температуры. Термоэлектрический и пьезоэлектрический эффекты.	Эффект Холла. Эффект Гомпсона. Индукция.	Электрическая индукция прохождения токов в жидкостях, газах и твердых телах.	Внешний и внутренний фотоэффект. Фотосопротивление.	Напряжение Вольты. Контактная разность потенциалов. Электролитическая проводимость. Концентрационный потенциал
Оптическая	Интерференция. Триболюминесценция.	Тепловое излучение. Затухание Флуоресценции. Термолюминесценция.	Магнитооптическое вращение плоскости поляризации (Эффект Фарадея) Эффект Зеемана	Эффект Керра. Эффект поляризации в различных агрегативных состояниях. Лазер.	Модуляторы. Преобразования длин волн при помощи электронно-оптических преобразователей (ЭОП) или люминофоров.	Эмиссия и абсорбция. Молекулярные спектры.
Молекулярная	—	Термоэмиссия, Жидкие кристаллы	—	Гальваническая ячейка	Фотоэмиссия Исползование электронно-оптических преобразователей	—

**Качество измерений** – совокупность свойств результата измерений, обуславливающих его пригодность для достижения цели измерений.

Для характеристики качества измерений используют следующие свойства: точность, достоверность, повторяемость (сходимость), правильность, воспроизводимость, метрологическую совместимость и метрологическую сопоставимость.

**Точность** – свойство результата измерений, отражающее его близость к истинному значению измеряемой величины. Для количественной характеристики точности используют значение погрешности или значения характеристик неопределенности измерений. Чем меньше погрешность/неопределенность – тем выше точность.

**Достоверность** – свойство результата измерений, характеризуемое степенью доверия к точности измерений. Достоверность оценивается вероятностью того, что значение погрешности/неопределенности не выходит за установленные границы или истинное значение величины находится в указанных пределах (такую вероятность называют доверительной).

**Повторяемость (сходимость) измерений** - близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом, в одинаковых условиях (в условиях повторяемости) и с одинаковой тщательностью. Повторяемость оценивается характеристиками случайной составляющей погрешности измерений или характеристиками неопределенности измерений. **Условия повторяемости (сходимости)** измерений включают применение одной и той же методики измерений, того же средства измерений, участие тех же операторов, те же рабочие условия, то же местоположение и выполнение повторных измерений на одном и том же или подобных объектах в течение короткого промежутка времени.

(Близость между показаниями или измеренными значениями величины, полученными при повторных измерениях для одного и того же или аналогичных объектов при заданных условиях обозначают термином **прецизионность**)

*Воспроизводимость* – близость результатов измерений величины (прецизионность), полученных в *условиях воспроизводимости*: разные местоположения, разные средства измерений, участие разных операторов и выполнение повторных измерений на одном и том же или аналогичных объектах.

*Правильность* – свойство результата измерений, характеризуемое близостью к нулю систематической составляющей погрешности измерений.

*Метрологическая совместимость* - свойство множества результатов измерений для определенной измеряемой величины, при котором абсолютное значение разности любой пары измеренных значений величины, полученное из двух различных результатов измерений, меньше, чем некоторое выбранное кратное стандартной неопределенности измерений этой разности. Если в серии измерений величины, которая предполагается постоянной, результат измерения несовместим с остальными, это означает, что или оценка точности измерения некорректна, или измеряемая величина изменилась за промежуток времени между измерениями.

*Метрологическая сопоставимость* (результатов измерений) - свойство результатов измерений для величин данного рода, обусловленное их метрологической прослеживаемостью к одной и той же основе для сравнения. "Основой для сравнения" может быть определение единицы измерения через ее практическую реализацию или методика измерений, или эталон.

(*Метрологическая прослеживаемость* – свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь калибровок, каждая из которых вносит вклад в неопределенность измерений).

Повышение качества измерений является одной из главных задач метрологического обеспечения.



## Литература

- 1.Международный словарь по метрологии: Основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр./ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. - СПб.: НПО "Профессионал", 2010.
- 2.РД 50-453-84 Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета
- 3.РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014.
- 4.РМГ 83 – 2007 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Шкалы измерений. Термины и определения. – ИПК Издательство стандартов, 2008.
- 5.Руководство по выражению неопределенности измерения. /Перевод с английского под ред. В.А. Слаева. – СПб.:ВНИИМ, 1999.
- 6.Сергеев А.Г., Тегеря В.В. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник. – М.: Юрайт, 2014.
- 7.Фридман А.Э. Основы метрологии. Современный курс. – СПб.: НПО «Профессионал», 2008.
- 8.JCGM 200:2012 International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM3).

## Содержание

1. Научные основы обеспечения единства измерений.....	3
1.1. Измерение. Шкалы измерений.....	3
1.2. Основные понятия метрологии .....	9
1.3. Единицы измерений .....	12
1.4. Погрешности и неопределенности измерений.....	23
1.5. Классификация измерений.....	31
1.6. Измерительное преобразование. Измерительные сигналы.	34
2. Технические основы обеспечения единства измерений...	41
2.1. Средства измерительной техники.....	41
2.2. Структурные элементы средств измерений.....	48
2.3. Метрологические характеристики средств измерений	50
2.4. Классы точности средств измерений.....	60
2.5. Методы измерений.....	66
2.6. Качество измерений.....	69
Литература.....	73

---

Св. план 2015 г., поз.

Гвоздев Владимир Дмитриевич

### **Прикладная метрология: Величины и измерения**

Учебное пособие

---

Подписано к печати -	Формат 60x84/16.	
Усл. – п.л. -	Заказ	Тираж - 100 экз.
150048, Ярославль, Московский пр., д. 151		

---

Типография Ярославского ж.д. техникума – филиала МИИТ