

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
Кафедра организации и стратегии развития промышленных предприятий

ИЗМЕРЕНИЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

*Методическая разработка
для практических занятий*

Самара
Издательство
Самарского государственного экономического университета
2015

Измерения. Обработка результатов измерений: методическая разработка для практических занятий / сост. В.Г. Уланов. - Самара : Изд-во Самар. гос. экон. ун-та, 2015. - 52 с.

Методическая разработка предназначена для студентов направлений "Торговое дело" по курсу "Стандартизация, метрология, подтверждение соответствия" и "Сервис" по курсу "Метрология, стандартизация и сертификация" с целью усвоения знаний и формирования компетенций в области метрологии при подготовке бакалавров к профессиональной деятельности.

Может быть использована студентами других специальностей всех форм обучения.

Печатается по решению
редакционно-издательского совета университета

Составитель канд. техн. наук, доцент **В.Г. Уланов**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Физические величины как объект измерения.....	5
1.1. Физические величины.....	5
1.2. Международная система единиц физических величин (SI)....	9
2. Классификация измерений.....	15
2.1. Виды и методы измерений.....	15
2.2. Качество измерений.....	23
3. Средства измерений.....	26
3.1. Метрологические характеристики и погрешности измерений.....	26
3.2. Выбор средств измерений.....	31
3.3. Единство измерений. Эталоны и их классификация.....	33
4. Обработка результатов измерений.....	36
4.1. Погрешности многократных измерений.....	36
4.2. Обработка результатов прямых многократных измерений....	39
Приложения.....	44
Литература.....	50

ВВЕДЕНИЕ

Измерения - это совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины. Любое измерение заключается в сравнении путем физического эксперимента измеряемой физической величины с некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения. Измерения являются основой научных знаний, служат для учета материальных ресурсов, обеспечения качества продукции, безопасности труда, совершенствования технологии, охраны здоровья и многих других областей деятельности. Между качеством продукции и качеством измерений существует непосредственная связь.

В науке об измерениях - метрологии - используют несколько общих свойств для всего многообразия физических объектов, которые выражены в форме постулатов:

- 1) постулат α . В рамках принятой модели объекта исследования существует определенная физическая величина и ее истинное значение;
- 2) постулат β . Истинное значение измеряемой величины постоянно;
- 3) постулат γ . Существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта.

При проведении измерений физически определяется расстояние между двумя точками, находящимися между фиксированными элементами измерительного инструмента. Каждому варианту стыковки измеряемой детали и измерительного инструмента будет соответствовать конкретный результат измерения. Исходя из этого, можно утверждать, что измеряемая величина существует лишь в рамках принятой модели, т.е. имеет смысл только до тех пор, пока модель признается адекватной объекту.

Конкретная процедура выполнения измерений рассматривается как последовательность сложных и разнородных действий, состоящих из ряда этапов, которые могут существенно различаться по числу, виду и трудоемкости выполняемых операций. В каждом конкретном случае соотношение и значимость каждого из этапов могут заметно меняться, но четкое выделение этапов и осознанное выполнение необходимого и достаточного числа действий измерения приводят к оптимизации процесса реализации измерений и устранению соответствующих методических ошибок. К числу основных этапов относятся следующие:

- постановка измерительной задачи;

- планирование измерений;
- проведение измерительного эксперимента;
- обработка экспериментальных данных.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ КАК ОБЪЕКТ ИЗМЕРЕНИЯ

1.1. Физические величины

Объект измерения - тело (физическая система, процесс, явление и т. д.), которое характеризуется одной или несколькими измеряемыми физическими величинами. Например: деталь, размеры которой измеряют при обработке; технологический процесс, во время которого измеряют температуру.

Любой объект окружающего нас мира характеризуется своими специфическими свойствами (длина, масса, время, температура и т.п.).

Свойство отражает такую сторону объекта (явления или процесса), которая характеризует его с новой стороны и обуславливает его отличие от других объектов или общность с ними. Одно и то же свойство может быть обнаружено у многих объектов или быть присущим только некоторым из них. Так, массой, температурой или плотностью обладают все материальные тела, а электропроводностью - только некоторые из них (металлы). Поэтому каждое из свойств физических объектов прежде всего должно быть обнаружено, затем описано и классифицировано, и только после этого можно приступить к его количественному изучению.

Для количественного описания различных свойств процессов и физических объектов служит понятие величины.

Величина - количественная характеристика размеров явлений, признаков, показателей их соотношения, степени изменения, взаимосвязи. Величина не существует сама по себе, а имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными этой величиной. Анализ различных величин позволяет разделить их на идеальные и реальные.

Идеальные величины в основном относятся к области математики и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий.

Реальные величины отражают реальные количественные свойства процессов и физических тел. Они, в свою очередь, делятся на физические и нефизические.

Физическая величина - одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них. Индивидуальность в количественном отношении понимают в том смысле, что свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого. Физическая величина может быть определена как величина, свойственная некоторым материальным объектам (процессам, явлениям, материалам), изучаемым в естественных (физика, химия) и различных технических науках. (В настоящее время в науке классифицировано более 2000 физических величин).

К **нефизическим** относят величины, присущие общественным наукам - философии, экономике и т. д. Для нефизических величин единица измерения не может быть введена в принципе. Их можно оценить с использованием экспертных оценок, балльной системы, набора тестов и т. д. Нефизические величины, при оценке которых неизбежно влияние субъективного фактора, так же, как и идеальные величины, не относятся к области метрологии.

Метрология как точная наука занимается в основном физическими величинами, которые делят на измеряемые и оцениваемые.

Измеряемая физическая величина (измеряемая величина) - физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи. Измеряемые физические величины можно выразить количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения.

Оцениваемая физическая величина - величина, для которой по какой-либо причине не может быть введена единица измерения, она может быть только оценена. Под оцениванием в таком случае понимают операцию приписывания исследуемой величине определенного числа, характеризующего ее размер.

Для того чтобы можно было установить различия в количественном содержании свойств в каждом объекте, отображаемых физической величиной, вводится понятие размера физической величины.

Размер физической величины - количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу.

Значение физической величины - выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц измерения.

Единица измерения физической величины - физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значе-

ние, равное 1, и которая применяется для количественного выражения однородных физических величин.

Истинным значением физической величины называют значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину. Истинное значение физической величины (теперь принято использовать термин "условно истинное") применяют при решении теоретических задач метрологии; а поскольку истинное значение какой-либо величины определить невозможно, при измерениях оперируют понятием действительного значения, степень приближения которого к истинному зависит от точности средства измерений и погрешности измерений.

Действительное значение физической величины - значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Для действительного значения величины всегда можно указать границы более или менее узкой зоны, в пределах которой с заданной вероятностью находится истинное значение физической величины.

Под *измеренным значением* понимают значение физической величины, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерений.

Средство измерения - техническое устройство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Понятия "измерение" и "физическая величина" связаны с понятием "шкала физической величины".

Шкала физической величины - упорядоченная совокупность значений физической величины, служащая исходной основой для измерений данной величины. Шкалой измерений называют порядок определения и обозначения возможных значений конкретной величины или проявлений какого-то свойства.

Условная шкала физической величины - шкала, исходные значения которой выражены в условных единицах. Под условными шкалами понимают, в частности, Международную сахарную шкалу, шкалы твердости материалов, светочувствительности фотоматериалов.

В теории измерений используют в основном шкалы четырех типов: наименований, порядка, интервалов и отношений (табл.1).

1. **Шкала наименований** (классификаций) - тип шкал, основанный на приписывании объекту цифр, которые выполняют функцию простых имен. Числа, приписанные объектам, могут быть использованы только

для определения вероятности или частоты появления данного объекта, но их нельзя использовать для суммирования и других математических операций. В этих шкалах отсутствуют понятия "нуль", "больше" или "меньше" и "единица измерения". Процесс оценивания по таким шкалам заключается в достижении эквивалентности путем сравнения исследуемого образца с одним из эталонов. Примером шкал наименований являются атласы цветов, предназначенные для идентификации цвета. Шкала наименований отражает качественные свойства.

Таблица 1

Типы шкал

Шкала наименований	Шкала порядка	Шкала интервалов	Шкала отношений
Приписывание объекту знаков с целью их идентификации	Упорядочение объектов относительного определенного свойства	Устанавливает единицу физической величины и откладывает разность	Интервальная шкала с естественным нулевым началом
Шкала цветов	Шкала Мюоса	Шкала температур	Шкала длины
Шкала вкусов	Шкала Бриннелля	Шкала Цельсия	Шкала массы
Шкала запахов	Шкала Роквелла	Шкала Фаренгейта	Шкала Кельвина
Шкала растений	Шкала Рихтера	Шкала Реомюра	
	Шкала Бофорта		
Оценивание		Измерение	

2. **Шкала порядка** (шкала рангов) служит для оценивания размеров величин, которые проявляют себя в отношении эквивалентности и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления данного свойства: твердости минералов (шкала Мюоса) (прил. 1); силы землетрясений (шкала Рихтера) (прил. 2); силы морского ветра (шкала Бофорта) (прил. 3) и др.

В этих шкалах (прил. 1-3) описывают количественные свойства (обычно имеется понятие о нуле шкалы), они показывают, что больше или меньше, хуже или лучше, но не устанавливают пропорциональность (линейность) изменения размеров величины относительно выбранного измерительного преобразования, по ним нельзя определить, во сколько раз больше или меньше.

3. **Шкала интервалов (разностей)**. Шкала состоит из одинаковых интервалов, имеет условную единицу измерения и произвольно выбранное начало отсчета нуль. Например, различные шкалы времени, начало которых выбрано по соглашению (от Рождества Христова и др.).

Шкалами интервалов являются температурные шкалы Цельсия, Реомюра и Фаренгейта. Результаты измерений по шкале отношений можно складывать и вычитать.

4. **Шкала отношений** имеет естественное нулевое значение, а единица измерений устанавливается по согласованию. Например, шкала весов, начинаясь с нулевой отметки, может быть градуирована по-разному в зависимости от требуемой точности взвешивания.

В шкале отношений нуль характеризует естественное нулевое количество данного свойства. Например, абсолютный нуль температурной шкалы. Это наиболее совершенная и информативная шкала. Результаты измерений в ней можно вычитать, умножать и делить. В некоторых случаях возможна и операция суммирования для аддитивных величин.

Аддитивной называется величина, значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент и разделены друг на друга (например, длина, масса, сила и др.). Неаддитивной величиной называется величина, для которой эти операции не имеют физического смысла, например, термодинамическая температура.

5. **Абсолютная шкала** имеет естественное однозначное определение единицы измерения и не зависит от принятой системы единиц измерения. Эти шкалы соответствуют относительным величинам: коэффициенту усиления, коэффициенту ослабления и т. д.

1.2. Международная система единиц физических величин (SI)

Развитие промышленного производства вызвало необходимость унификации размеров физических величин (ФВ), создание системы единиц. Первой системой единиц ФВ была метрическая система. Вначале она была введена во Франции (1840), затем в других странах (Великобритании, США, России и пр.). Наряду с метрической системой в этих и других странах применялись и применяются в настоящее время и национальные системы.

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам утвердила Международную систему единиц физических величин (сокращенно SI от французского наименования "Systeme International d' Unites", русское обозначение СИ) на основе шести основных единиц: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина и свеча. В 1971 г. в систему была добавлена седьмая основная единица - количество вещества (моль). Генеральной конференцией были утверждены дополнительные (радиан и стерадиан) и производные единицы физических величин.

В Российской Федерации единицы величин Международной системы применяются с 1 января 1982 г. в соответствии с ГОСТ 8.417 "ГСИ. Единицы физических величин" (в настоящее время ГОСТ 8.417-2002).

Основные принципы построения системы SI:

- система базируется на независимых друг от друга основных единицах;
- производные единицы определяют на основе простейших физических формул (уравнений), связывающих между собой физические величины;
- система является когерентной;
- в систему входят десятичные кратные и дольные единицы;
- наряду с единицами SI допускаются широко используемые на практике внесистемные единицы.

Преимущества Международной системы единиц:

1. Универсальность - система охватывает все области науки, техники и народного хозяйства.
2. Унификация единиц для всех видов измерений. Вместо исторически сложившегося многообразия единиц (системных, разных систем и внесистемных) для каждой физической величины устанавливается одна единица и четкая система образования кратных и дольных единиц.
3. Единицы SI по своему размеру удобны для практического применения.
4. Переход на нее повышает уровень точности измерений, так как основные единицы этой системы могут быть воспроизведены более точно, чем единицы других систем.
5. Выбор основных единиц системы обеспечивает согласованность (*когерентность*) механических и электрических единиц. Например, Ватт - единица механической мощности (джоуль в секунду) равняется мощности, выделяемой электрическим током силой 1 ампер при напряжении 1 вольт.
6. Четкое разграничение в SI единиц массы (килограмм) и силы (Ньютон).
7. Упрощенная запись уравнений и формул в различных областях науки и техники. Достигается значительная экономия времени при расчетах в силу отсутствия в формулах, составленных с применением единиц SI, пересчетных коэффициентов, вводимых в связи с тем, что отдельные величины в этих формулах выражены в разных системах единиц.
8. Установление в Международной системе единиц общей единицы - джоуль - для всех видов энергии (механической, тепловой, электрической и др.).
9. Это единая международная система, и ее единицы распространены.

Преимущества системы SI обуславливают:

- а) повышение эффективности труда проектировщиков, конструкторов, производственников, научных работников;
- б) облегчение педагогического процесса в средней и высшей школах;
- в) лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и экономических связей между разными странами.

В связи с тем, что национальные стандарты приобрели статус добровольно используемых документов, возникла необходимость в регламентации применения единиц величин в РФ с помощью нормативного документа высокого ранга. Постановлением Правительства РФ от 31.10.2009 № 879 утверждено "*Положение о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации*". При разработке этого документа был учтен опыт регламентации применения единиц величин, накопленный в период применения ГОСТ 8.417.

В акте закреплены единицы величин, допускаемые к применению:

- основные единицы Международной системы - метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела;
- производные единицы величин, определенные через основные единицы SI;
- когерентные единицы SI;
- десятичные кратные и дольные единицы SI;
- относительные и логарифмические единицы;
- внесистемные единицы величин, применяемые в отдельных областях деятельности.

Кроме того, в постановлении установлены правила образования наименований производных, когерентных, десятичных кратных и дольных единиц SI, правила применения единиц величин в нормативных правовых актах, нормативно-технических, научно-технических, конструкторских, технологических документах, в учебниках и других изданиях.

Генеральная конференция разработала следующие определения и обозначения основных единиц (табл. 2):

Таблица 2

Определения и обозначения основных единиц

Величина	Единица		Определение	
	Наименование	Обозначение		
		международное		русское
1	2	3	4	5
Длина, L	метр	m	м	Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299792458$ с

1	2	3	4	5
Масса, M	килограмм	kg	кг	Килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма
Время, T	секунда	s	с	Секунда есть время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133
Электрический ток (сила электрического тока), I	ампер	A	А	Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 m один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 m силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7} H$
Термодинамическая температура, Θ	кельвин	K	К	Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды
Сила света, J	кандела	cd	кд	Кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12} Hz$, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 W/sr
Количество вещества, N	моль	mol	моль	Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц

Примечания

1. Кроме термодинамической температуры (обозначение T), допускается применять также температуру Цельсия (обозначение t), определяемую выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273,15$ К. Термодинамическую температуру выражают в кельвинах, температуру Цельсия - в градусах Цельсия. По размеру градус Цельсия равен Кельвину. Градус Цельсия - это специальное наименование, используемое в данном случае вместо наименования "кельвин".
2. Интервал, или разность термодинамических температур, выражают в кельвинах. Интервал, или разность температур Цельсия, допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия.
3. Обозначение Международной практической температуры в Международной температурной шкале 1990 г., если ее необходимо отличить от термодинамической температуры, образуют путем добавления к обозначению термодинамической температуры индекса "90" (например, T_{90} или t_{90}).

В систему SI введены две **дополнительные единицы** - радиан и стерадиан:

- единица плоского угла - *радиан* - угол между двумя радиусами окружности, длина дуги которой равна радиусу. В градусном исчислении радиан равен $57^{\circ}17'44,8''$;

- единица телесного угла - *стерадиан* - телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Дополнительные единицы SI использованы для образования единиц угловой скорости, углового ускорения и некоторых других величин. Сами по себе радиан и стерадиан применяются в основном для теоретических построений и расчетов.

Производная единица SI - это единица производной физической величины системы единиц, образованная в соответствии с уравнениями, связывающими ее с основными единицами или с основными и уже определенными производными. Производные единицы SI образуют по правилам образования когерентных производных единиц SI (табл. 3).

Таблица 3

Примеры некоторых производных единиц SI, образованных с использованием основных единиц SI

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
1	2	3	4	5
Площадь	L^2	квадратный метр	m^2	$м^2$
Объем, вместимость	L^3	кубический метр	m^3	$м^3$

1	2	3	4	5
Скорость	LT^{-1}	метр в секунду	m/s	м/с
Ускорение	LT^{-2}	метр на секунду в квадрате	m/s^2	м/с ²
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
Яркость	$L^{-2}J$	кандела на квадратный метр	cd/m^2	кд/м ²

Когерентной называется производная единица физической величины, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель принят равным единице (например, единица скорости - м/с). Если уравнение связи содержит числовой коэффициент, отличный от единицы, то для образования когерентной единицы SI в правую часть уравнения подставляют величины со значениями в единицах SI, дающие после умножения на коэффициент общее числовое значение, равное единице.

Различают кратные и дольные единицы.

Кратная единица - это единица физической величины, в целое число раз превышающая системную или внесистемную единицу. Например, единица длины - километр - равна 10^3 м, т. е. кратна метру.

Дольная единица - единица физической величины, значение которой в целое число раз меньше системной или внесистемной единицы. Например, единица длины - миллиметр - равна 10^{-3} м, т. е. является дольной.

Все основные, производные, кратные, дольные единицы являются системными.

Системная единица - единица физической величины, входящая в одну из принятых систем. Единицы физической величины, не входящие ни в одну из принятых систем единиц, называются **внесистемными**.

Внесистемные единицы по отношению к единицам SI разделяют на четыре вида:

- допускаемые наравне с единицами SI: например, единица массы - тонна; плоского угла - градус, минута, секунда; объема - литр и др.;

- допускаемые к применению в специальных областях: например, астрономическая единица, парсек, световой год - единицы длины в астрономии; диоптрия - единица оптической силы в оптике; электрон-вольт - единица энергии в физике и т. д.;

- временно допускаемые к применению наравне с единицами SI: например, морская миля - в морской навигации; карат - единица массы в ювелирном деле и др. Эти единицы должны изыматься из употребления в соответствии с международными соглашениями;

- изъятые из употребления: например, миллиметр ртутного столба - единица давления; лошадиная сила - единица мощности и некоторые другие.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Виды и методы измерений

В учебниках метрологии рассматривают разные варианты классификации видов измерений.

При классификации обычно исходят из характера зависимости измеряемой величины от времени, вида уравнения измерений, условий, определяющих точность результата измерений, и способов выражения результатов, из необходимой скорости измерения, условий и режимов измерений и пр. На рис. 1 представлена классификация видов измерений.

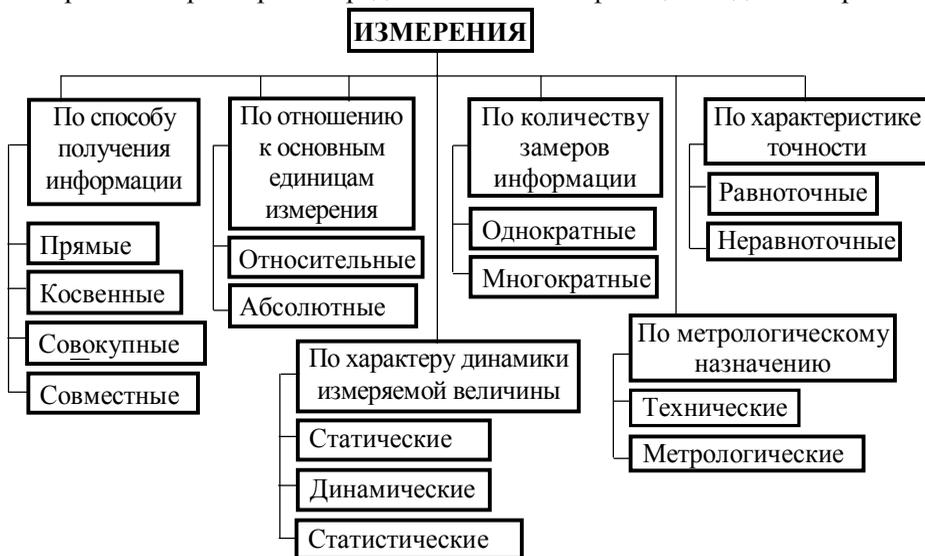


Рис. 1. Классификация видов измерений

Вид измерений - часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин. Например, в области электрических и магнитных измерений можно выделить измерения электрического сопротивления, электродвижущей силы, электрического напряжения, магнитной индукции и пр.

Подвид измерений - часть вида измерений, выделяющаяся особенностями измерений однородной величины (по диапазону, размеру и др.). Например, при измерении мощности выделяют измерения больших мощностей (тысячи кВт), средних (десятки Вт), малых (единицы Вт) и сверхмалых мощностей (доли мкВт).

По способам получения информации измерения делят на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

Прямое измерение - измерение, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно. При прямых измерениях измеряемую величину сравнивают с мерой непосредственно или же с помощью измерительных приборов, градуированных в требуемых единицах. Например, измерение длины линейкой.

Прямые измерения можно охарактеризовать формулой

$$A = x,$$

где x - значение величины, найденное путем ее измерения и называемое *результатом измерения*.

Косвенное измерение - определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. Например, измерение мощности методом амперметра-вольтметра, определение площади круга измерением диаметра. К косвенным относят те измерения, при которых расчет осуществляют вручную или автоматически, но только после получения результатов прямых измерений.

Косвенные измерения описывают формулой

$$A = f(x_1, x_2, \dots, x_m),$$

где x_1, x_2, \dots, x_m - результаты прямых измерений величин, связанных функциональной зависимостью f с искомым значением измеряемой величины A .

Совокупными называют проводимые одновременно измерения нескольких **одноименных** величин, при которых искомые значения величин определяются путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях. При этом прямыми или косвенными методами могут измеряться несколько комбинаций значений величин.

Совместными называют проводимые одновременно измерения двух или нескольких **разноименных** величин для определения зависимости между ними. Как следует из приведенных определений, совокупные и совместные измерения весьма близки друг к другу. В обоих случаях искомые значения находят в результате решения системы уравнений, коэффициенты в которых получены путем прямых измерений. Отличие этих видов измерений состоит в том, что при совокупных измерениях одновременно определяют несколько одноименных величин, а при совместных - разноименных величин.

Косвенные, совместные и совокупные измерения объединяются одним принципиально важным общим свойством: их результаты рассчитываются по известным функциональным зависимостям между измеряемыми величинами и величинами, определяемыми в основном путем

прямых измерений. Различие между этими видами измерений заключается только в виде функциональной зависимости, используемой при расчетах. При косвенных измерениях она выражается одним уравнением в явном виде (например, сопротивление резистора $R = U/I$), при совместных и совокупных - системой сложных или неявных уравнений.

В зависимости от выражения результатов измерения делят на абсолютные и относительные.

Абсолютное измерение - измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Например, измерение силы электрического тока в амперах, измерение напряжения $U = IR$ основано на измерении основной величины - силы тока I и использовании физической постоянной R (в точках измерения сопротивления).

Примечание: понятие "абсолютное измерение" применяется как противоположное понятию "относительное измерение" и рассматривается как измерение величины в ее единицах.

Относительное измерение - измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

В зависимости от используемого метода измерения и метрологических свойств применяемых средств измерений все рассмотренные виды измерений могут выполняться **однократно или многократно**.

Однократное измерение - измерение, выполненное один раз.

На практике во многих случаях выполняются именно однократные измерения, если результат измерений удовлетворяет условиям измерительной задачи: например, измерение конкретного момента времени по часам обычно производят один раз. Для производственных процессов также более характерны однократные технические измерения, поскольку во многих случаях измерять несколько раз технически невозможно.

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

По характеру динамики изменения измеряемой величины во времени различают статические, динамические и статистические измерения.

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

Динамическое измерение - измерение изменяющейся по размеру физической величины (измерение оборотов вала тахометром). Результа-

том динамического измерения является функциональная зависимость измеряемой величины от времени, т. е. когда выходной сигнал изменяется во времени в соответствии с изменением измеряемой величины. Пример - определение мгновенных значений сигнала во времени.

Статистические измерения - измерения, связанные с определением характеристик случайных процессов (звуковых сигналов, уровня шумов и др.), а также с определением закономерностей общественной деятельности человека.

По точности измерений их делят на равноточные и неравноточные.

Равноточные измерения - ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью. При равноточных измерениях результаты всего ряда измерений могут быть близки и даже равны.

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

По метрологическому назначению выделяют измерения технические и метрологические.

Технические измерения выполняют рабочими средствами измерения, при этом принимается наперед заданная погрешность, достаточная для решения данной технической задачи

Метрологические измерения выполняют с помощью эталонов с целью воспроизведения единиц физических величин для передачи их размера рабочим средствам измерения.

Можно также выделить виды измерений в зависимости от цели их проведения: контрольные, диагностические и прогностические, лабораторные и поверочные и т. д.

По необходимой точности оценки погрешности измерения делят на следующие виды:

- *высшей точности (прецизионные), связанные с созданием эталонов и измерением фундаментальных физических констант;*
- *технические измерения, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений, регламентированными условиями измерений, и оценивается до проведения измерений;*
- *контрольно-поверочные, погрешность которых не должна превышать некоторых заранее заданных значений.*

Метод измерений - прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений.

Примечание: метод измерений обычно обусловлен устройством средств измерений, поэтому это достаточно общее определение на прак-

тике часто конкретизируют, относя его только к применяемым средствам измерения, например, метод измерения частоты частотомером, напряжения - вольтметром, силы тока - амперметром и т. д.

Конкретные методы измерений определяются видом измеряемых величин, их размерами, требуемой точностью результата, быстротой процесса измерения, условиями, при которых проводят измерения, и рядом других признаков. В принципе каждую физическую величину можно измерить несколькими методами, которые могут отличаться друг от друга особенностями как технического, так и методического характера. С методической стороны все представленные методы измерений поддаются систематизации и обобщению по общим характерным признакам (рис. 2).

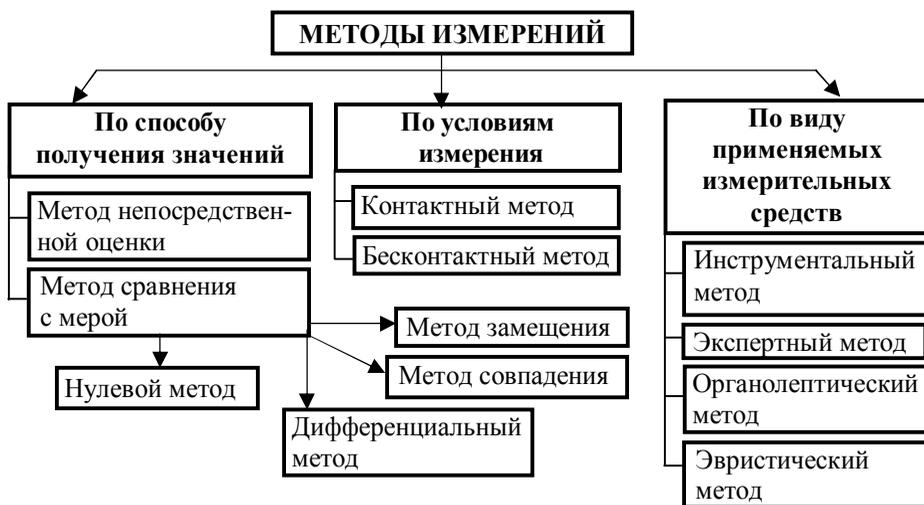


Рис. 2. Классификация методов измерений

Современные методы измерений достаточно условно можно разделить на два больших класса: непосредственной оценки и сравнения с известной мерой.

Метод непосредственной оценки - метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по показывающему средству измерений. Например, взвешивание на циферблатных весах, определение размера детали с помощью микрометра. Быстрота процесса измерения методом непосредственной оценки делает его часто незаметным для практического использования, хотя точность измерения обычно ограничена.

Метод сравнения с мерой - метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Приборы, реализующие измерение на основе метода сравнения, называют измерительными приборами сравнения. В отличие от приборов непосредственной оценки, более удобных для получения оперативной информации, приборы сравнения обеспечивают большую точность измерений.

Различают следующие разновидности метода сравнения.

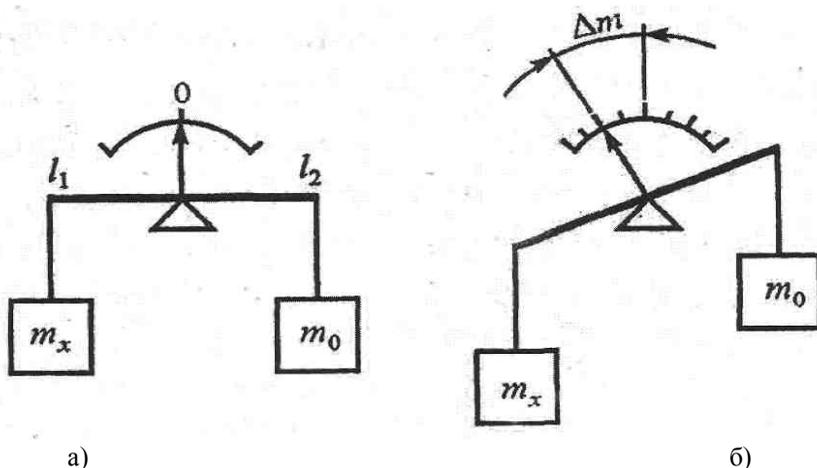


Рис. 3. Нулевой (а) и дифференциальный (б) методы измерений

Нулевой метод измерений - метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля (см. рис. 3а). Нулевой метод имеет преимущество в том, что мера может быть во много раз меньше измеряемой величины, когда на одном плече находится измеряемый груз, а на другом набор эталонных грузов.

Дифференциальный метод измерений - метод измерений, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими величинами.

Метод измерений замещением - метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. Метод замещения (рис. 4а) применяется при взвешивании с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашу весов.

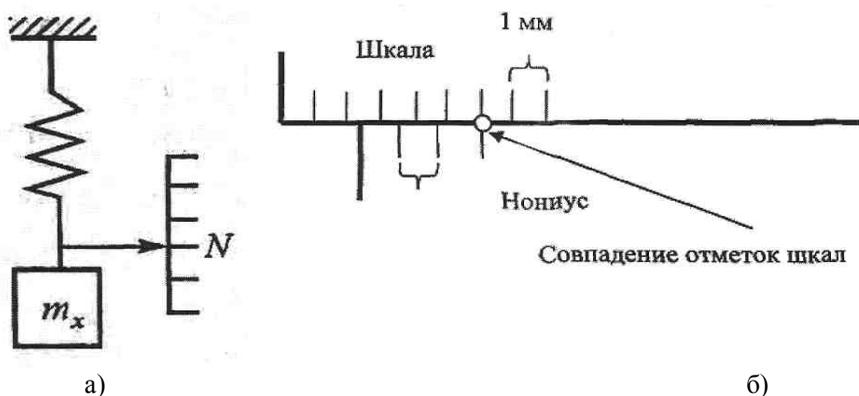


Рис. 4. Методы замещения (а) и совпадения (б)

Метод совпадений - метод измерений, при котором разность между сравниваемыми величинами и мерой измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Например, при измерении частоты вращения стробоскопом - совпадение метки на вращающемся объекте с моментом вспышек известной частоты. На рис. 4б показана схема считывания результата измерения штангенциркулем по совпадающим штрихам основной шкалы и шкалы нониуса.

Из всех перечисленных методов **нулевой метод** обеспечивает наибольшую точность измерений физической величины.

Контактный метод измерений - метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения. Например, измерение температуры объекта термометром или термпарой, измерение длины линейкой.

Бесконтактный метод измерений - метод измерений, основанный на том, что чувствительный элемент средства измерений не приводится в контакт с объектом измерения. Например, измерение микроскопом, измерение расстояния до объекта радиолокатором.

В зависимости от измерительных средств, используемых в процессе измерения, различают инструментальный, экспертный, органолептический и эвристический методы измерений.

Инструментальный метод основан на использовании специальных технических средств, например микроскопа, штангенциркуля, профилометра и др.

Экспертный метод оценки основан на использовании данных нескольких специалистов. Широко применяется в квалиметрии, медицине, спорте, искусстве.

Органолептический метод оценки основан на использовании органов чувств человека (обоняние, осязание, зрение, слух и вкус). Часто используются измерения на основе впечатлений (конкурсы, соревнования).

Эвристические методы основаны на интуиции. Например, метод попарного сопоставления, когда измеряемые величины сначала сравниваются между собой попарно, а затем производится ранжирование на основании результатов этого сравнения.

При измерениях используют следующие термины:

Наблюдение при измерении - операция, проводимая при измерении и имеющая целью своевременно и правильно произвести отсчет. Итог наблюдения - *результат* - всегда случаен и представляет собой одно из значений измеряемой величины, подлежащей совместной обработке для получения результата измерения.

Отсчет показаний - фиксация значения величины или числа по показывающему устройству средства измерений в заданный момент времени. Например, зафиксированное в некоторый момент времени по табло вольтметра значение, равное 220 В, является отсчетом его показаний на этот момент.

Измерительная информация - информация о значениях физических величин.

Измерительная задача - задача, состоящая в определении значения физической величины путем ее измерения с требуемой точностью в данных условиях измерений.

Объект измерения - тело (физическая система, процесс, явление и т. д.), которое характеризуется одной или несколькими измеряемыми физическими величинами.

Математическая модель объекта - совокупность математических символов и отношений между ними, которая адекватно описывает свойства объекта измерения. В общем случае теоретические методы в виде математических моделей позволяют описывать и объяснять взаимосвязи элементов изучаемого объекта в относительно широких диапазонах изменения переменных величин. Однако при построении теоретических моделей неизбежно введение каких-либо ограничений, допущений, гипотез и т.п. Поэтому возникает задача оценки достоверности (адекватности) полученной модели реальному процессу или объекту, в связи с чем проводят экспериментальную проверку разработанных теоретических моделей.

Алгоритм измерения - точное предписание о порядке выполнения операций, обеспечивающих измерение физической величины.

Область измерений - совокупность измерений физических величин, свойственных какой-либо области науки или техники и выделяющихся своей спецификой.

2.2. Качество измерений

Процесс измерения неизбежно сопровождается ошибками, которые являются следствием несовершенства измерительных средств, нестабильности условий проведения измерений, несовершенства самого метода и методики измерений, недостаточного опыта и несовершенства органов чувств человека, выполняющего измерения, а также других факторов.

Под *качеством измерений* понимают совокупность свойств, обуславливающих получение результатов необходимого вида с требуемыми характеристиками точности и в установленные сроки. Качеству измерений свойственны такие показатели, как точность, правильность и достоверность.

Термин "*точность измерений*", т. е. степень приближения результатов измерения к некоторому действительному значению, не имеет строгого определения и используется для качественного сравнения измерительных операций. Для количественной оценки применяется понятие "*погрешность измерений*" (чем меньше погрешность, тем выше точность). Оценка погрешности измерений - одно из важных мероприятий по обеспечению единства измерений.

Понятие "погрешность" требует определения и четкого разграничения трех понятий:

1. *Истинное значение измеряемой физической величины* - значение, идеальным образом отражающее свойство данного объекта как в количественном, так и в качественном отношении. Практически оно всегда неизвестно.

2. *Действительное значение измеряемой физической величины* - значение, найденное экспериментально и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели оно может быть использовано вместо него. Действительное значение может быть получено при помощи рабочих эталонов.

3. *Результат измерения* - приближенная оценка истинного значения величины, найденная путем измерения (результат, полученный с помощью рабочего средства измерения).

Погрешность результата измерения - это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. *По способу выражения* различают:

1) погрешность измерения, выраженную в единицах измеряемой величины, которая называется *абсолютной*. Она не всегда является информативной. Например, абсолютная погрешность 0,01 мм может быть достаточно большой при измерениях величин в десятые доли миллиметра и малой при измерениях величин, размеры которых превышают несколько метров;

2) более информативную **относительную погрешность**, под которой понимают отношение абсолютной погрешности измерения к ее истинному значению (или математическому ожиданию). Именно относительная погрешность используется для характеристики точности измерения;

3) **приведенную погрешность**, представляющую собой отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению (постоянному во всем диапазоне измерений или его части).

В зависимости от характера проявления, причин возникновения и возможностей устранения различают систематическую и случайную составляющие погрешности измерений, а также грубые погрешности (промахи).

К **систематическим погрешностям** относят те, которые при повторных измерениях остаются постоянными или изменяются по какому-либо закону.

Систематические погрешности при измерении одним и тем же методом и одними и теми же измерительными средствами всегда имеют постоянные значения. К причинам, вызывающим их появление, относят:

- субъективную составляющую, связанную с индивидуальными особенностями оператора;
- методическую составляющую - погрешности метода, или теоретические погрешности, которые происходят вследствие ошибок или недостаточной разработанности метода измерений;
- инструментальные погрешности, связанные с погрешностями средств измерения, вызванными погрешностями изготовления или износом составных частей измерительного средства;
- погрешности, вызванные воздействием окружающей среды и условий измерения: температура (например, измерения еще не остывшей детали), вибрации и т. п.

Для исключения систематической погрешности в производственных условиях проводят проверку средств измерений, устраняют те причины, которые вызваны воздействиями окружающей среды, сами измерения проводят в строгом соответствии с рекомендуемой методикой, принимая в необходимых случаях меры по ее совершенствованию.

Полностью систематическую погрешность исключить практически невозможно; всегда в процессе измерения остается некая малая величина, называемая неисключенной систематической погрешностью. Эта величина учитывается путем внесения поправок.

Случайные погрешности - погрешности, принимающие при повторных измерениях различные, независимые по знаку и величине зна-

чения, не подчиняющиеся какой-либо закономерности. Причин, вызывающих случайные погрешности, может быть много: например, колебание припуска на обработку, механические свойства материалов, посторонние включения, точность установки деталей на станок, точность средства измерения, изменение измерительного усилия крепления детали на станке, силы резания и др.

Как правило, индивидуальное влияние каждой из этих причин на результаты измерения невелико и не поддается оценке, тем более, что, как всякое случайное событие, оно в каждом конкретном случае может произойти или не произойти.

Для случайных погрешностей характерен ряд условий:

- малые по величине случайные погрешности встречаются чаще, чем большие;

- отрицательные и положительные относительно средней величины измерений, равные по величине погрешности встречаются одинаково часто;

- для каждого метода измерений есть свой предел, за которым погрешности практически не встречаются (в противном случае эта погрешность будет грубым промахом).

Выявление случайных погрешностей особенно необходимо при точных, например лабораторных, измерениях. Для этого используют многократные измерения одной и той же величины, а их результаты обрабатывают методами теории вероятностей и математической статистики, что позволяет уточнить результаты выполненных измерений.

Влияние случайных погрешностей выражается в разбросе полученных результатов относительно математического ожидания, поэтому количественно наличие случайных погрешностей хорошо оценивается среднеквадратическим отклонением (СКО).

Случайные погрешности измерения, не изменяя точности результата измерений, тем не менее, оказывают влияние на его достоверность.

При этом дисперсия среднего арифметического ряда измерений всегда имеет меньшую погрешность, чем погрешность каждого определенного измерения. Если необходимо повысить точность результата (при исключенной систематической погрешности) в 2 раза, то количество измерений надо увеличить в 4 раза.

Грубые погрешности (промахи) - это погрешности, не характерные для технологического процесса или результата, приводящие к явным искажениям результатов измерения. Наиболее часто они допускаются неквалифицированным персоналом при неправильном обращении со средством измерения, неверном отсчете показаний, ошибках при записи

или вследствие внезапно возникшей посторонней причины при реализации технологических процессов обработки деталей. Они сразу видны среди полученных результатов, так как их значения отличаются от остальных значений совокупности измерений.

Правильность измерений определяется близостью к нулю систематической погрешности.

Достоверность измерений зависит от степени доверия к результату и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины лежит в указанных окрестностях действительного.

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Метрологические характеристики и погрешности измерений

Средством измерений (СИ) называют техническое средство (или их комплекс), используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Для каждого типа средства измерений устанавливаются свои метрологические характеристики. На практике наиболее распространенными являются следующие:

- **Диапазон измерений СИ** - область значений величины, в пределах которой нормированы его допускаемые пределы погрешности. Для мер это их номинальное значение, для преобразователей - диапазон преобразования. Различают нижний и верхний пределы измерений, которые выражаются значениями величины, ограничивающими диапазон измерений снизу и сверху.

- **Пределы измерения** - наибольшее или наименьшее значение диапазона измерения.

- **Цена деления шкалы** - разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

- **Длина (интервал) деления шкалы** - расстояние между осями двух соседних отметок шкалы.

- **Чувствительность** - отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызвавшему это изменение изменению входного сигнала. Если чувствительность постоянная, т.е. функция преобразования линейная, то шкала прибора равномерная. В противном случае шкала будет неравномерная.

- **Порог чувствительности** - изменение измеряемой величины, вызывающее наименьшее изменение выходного сигнала, которое может быть обнаружено при обычном для данного прибора способе отсчета.

- **Погрешность СИ** - разность между показанием средства измерений X_n и истинным (действительным) значением измеряемой величины X_D .

Существует распространенная классификация погрешностей средств измерений. Ниже приводятся примеры их наиболее часто используемых видов.

В зависимости от условий проведения измерений погрешности средств измерений подразделяются на основные и дополнительные.

- **Основная погрешность СИ** - погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях, т. е. в условиях, которые определены в нормативно-технической документации (НТД) на него как нормальные. Нормальные значения влияющих величин указываются в стандартах или технических условиях на средства измерений данного вида в форме номиналов с нормированными отклонениями. Наиболее типичными нормальными условиями являются: температура $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$; относительная влажность $(65 \pm 15)\%$; атмосферное давление $(100 \pm 4 \text{ кПа}$ или $750 \pm 30 \text{ мм рт. ст.})$; напряжение питания электрической сети $(220 \text{ В} \pm 2\%$ с частотой 50 Гц).

Иногда вместо номинальных значений влияющих величин указывается нормальная область их значений. Например, влажность (30-80)%.

Пределы допускаемой основной погрешности задают в виде:

- **абсолютной погрешности СИ** - погрешности средства измерений, выраженной в единицах измеряемой величины:

$$\Delta X = X_n - X_\partial.$$

Если абсолютная погрешность не изменяется во всем диапазоне измерения, то она называется *аддитивной*, если она изменяется пропорционально измеряемой величине (увеличивается с ее увеличением), то она называется *мультипликативной*;

- **относительной погрешности СИ** - погрешности средства измерений, выраженной отношением абсолютной погрешности СИ к результату измерений или к действительному значению измеренной величины:

$$\delta = \Delta X / X_\partial.$$

Относительная погрешность дает наилучшее из всех видов погрешностей представление об уровне точности измерений;

- **приведенной погрешности СИ** - относительной погрешности, выраженной отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины X_N , которое называют нормирующим:

$$\gamma = \Delta X / X_N.$$

Приведенные погрешности позволяют сравнивать по точности средств измерений, имеющие разные пределы измерений, если абсолютные погрешности каждого из них не зависят от значения измеряемой величины.

Относительные и приведенные погрешности обычно выражают либо в процентах, либо в относительных единицах (долях единицы).

- **Дополнительная погрешность СИ** - составляющая погрешности СИ, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения.

В зависимости от режима применения различают:

- **статическую погрешность СИ** - погрешность, возникающую при использовании измерительных средств для измерения постоянной величины;

- **динамическую погрешность СИ** - погрешность, возникающую при использовании измерительного средства для измерения переменной во времени величины.

При выборе средств измерения для конкретных условий производства важной характеристикой является класс точности.

Класс точности СИ - обобщенная характеристика, выражаемая пределами допускаемых (основной и дополнительной) погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность.

Класс точности позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность измерений данного класса. Это необходимо знать при выборе точности будущих измерений.

Присваиваются классы точности СИ при их разработке (по результатам приемочных испытаний). В процессе эксплуатации метрологические характеристики обычно ухудшаются, допускается понижать класс точности по результатам поверки (калибровки).

Требования к назначению, применению и обозначению классов точности регламентированы в ГОСТ 8.401-80 "ГСИ. Классы точности средств измерений. Основные положения". Этот стандарт гармонизирован с международными рекомендациями.

Если пределы допускаемой основной погрешности выражены в форме абсолютной погрешности СИ, то класс точности обозначается прописными буквами (М, С и др.) латинского алфавита. Классам точности, которым соответствуют меньшие пределы допускаемых погрешностей, присваиваются буквы, находящиеся ближе к началу алфавита.

Для средств измерений, пределы допускаемой погрешности которых принято выражать в форме приведенной погрешности, классы точности следует обозначать числами, которые равны этим пределам, выраженным в процентах. В этом случае класс точности означает, что значение измеряемой величины не отличается от показания прибора более чем на соответствующее число процентов от нормирующего (максимального) значения шкалы.

По приведенной погрешности приборы делятся:

- 1) на *технические* - класса точности 1; 1,5; 2,5; 4;

2) лабораторные - класса точности 0,1; 0,2; 0,5.

Пример 1: точность прибора 1,5; показание 75; максимальное значение шкалы 200.

Абсолютную погрешность определяем из формулы: $\gamma = 100\Delta/X_H$,

$$\Delta = \gamma X_H / 100 = 1,5 \cdot 200 / 100 = 3.$$

Результат измерения: 75 ± 3 .

Если погрешность нормирована от длины шкалы (для неравномерных шкал), то под обозначение цифрой ставят знак $0,5$.

Пример 2: точность прибора $0,5$; показание 120; минимальное и максимальное значение шкалы 50 и 200.

Нормированное значение длины шкалы

$$X_H = X_{\max} - X_{\min} = 200 - 50 = 150.$$

Абсолютная погрешность

$$\Delta = \gamma X_H / 100 = 0,5 \cdot 150 / 100 = 0,75.$$

Результат измерения: $120,00 \pm 0,75$.

Для СИ, у которых пределы допускаемой основной погрешности выражены в форме **относительной погрешности**, класс точности обозначают числами, которые равны этим пределам, выраженным в процентах. Если число заключено в окружность, это означает, что проценты исчисляются от числа показания прибора.

Пример 3: точность прибора $(0,5)$; показание 80; максимальное значение шкалы 200.

Абсолютную погрешность определяем из формулы: $\delta = 100\Delta / X$.

$$\Delta = \delta \cdot X / 100 = 0,5 \cdot 80 / 100 = 0,4.$$

Результат: $80,0 \pm 0,4$.

Если класс точности задан числами, разделенными чертой (0,02/0,01), то абсолютную погрешность определяют из формулы:

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

где x - измеренное значение;

X_k - больший (по модулю) из пределов измерений;

$c = 0,02$; $d = 0,01$, заданные показатели точности (0,02/0,01).

Пример 4: точность прибора 0,02/0,01; показание 50; максимальное значение шкалы 200.

Определяем абсолютную погрешность:

$$\Delta = [0,02 + 0,01(200 / 50 - 1)] \cdot 50 / 100\% = 0,025.$$

Результат: $50,000 \pm 0,025$.

Средствам измерений с двумя и более диапазонами измерений одной и той же физической величины допускается присваивать два и более класса точности, а средствам измерений, предназначенным для измерений двух или более физических величин, допускается присваивать различные классы точности для каждой измеряемой величины.

Обозначения классов точности наносятся на циферблаты, щитки и корпуса средств измерений, приводятся в нормативно-технической документации и осуществляются в зависимости от способов задания пределов допускаемой основной погрешности (рис. 5).

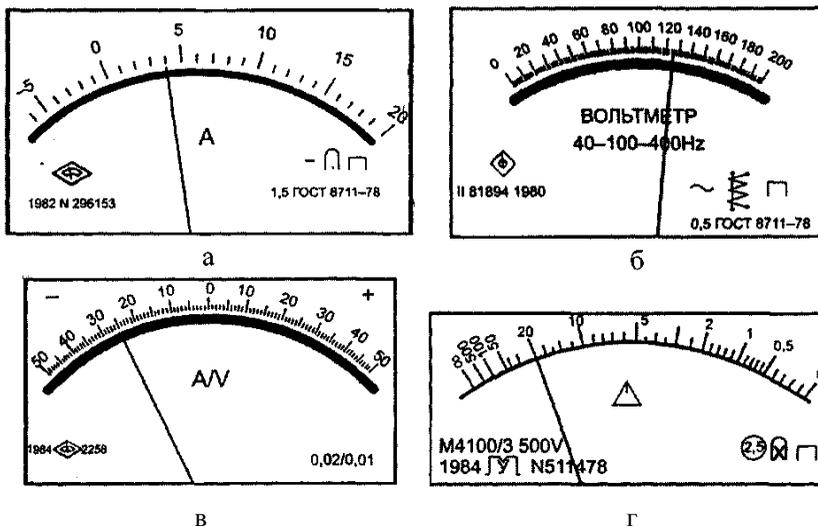


Рис. 5. Лицевые панели приборов:

- а - амперметра класса точности 1,5; б - вольтметра класса точности 0,5;
- в - амперметра класса точности 0,02/0,01; г - мегамметра класса точности 2,5

Оценка погрешности при косвенных измерениях

Косвенным называется измерение данной величины *a* через непосредственное измерение величин *X, Y, Z* ..., функционально связанных с первой величиной.

Таблица 4

Формулы определения абсолютной и относительной погрешностей

Вид функции	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$a = x + y + z$	$\Delta a = \Delta x + \Delta y + \Delta z$	$\varepsilon = (\Delta x + \Delta y + \Delta z) / (x + y + z)$
$a = x - y$	$\Delta a = \Delta x + \Delta y$	$\varepsilon = (\Delta x / x) / (\Delta y / y)$
$a = x y$	$\Delta a = x \Delta y + y \Delta x$	$\varepsilon = (\Delta x / x) + (\Delta y / y)$
$a = x y z$	$\Delta a = xy \Delta z + xz \Delta y + yz \Delta x$	$\varepsilon = (\Delta x / x) + (\Delta y / y) + (\Delta z / z)$
$a = x / y$	$\Delta a = (x \Delta y + y \Delta x) / y^2$	$\varepsilon = (\Delta x / x) + (\Delta y / y)$
$a = x^n$	$\Delta a = n x^{n-1} \Delta x$	$\varepsilon = n \Delta x / x$

Результат косвенного измерения величины a зависит от точности измерений величин $X, Y, Z...$ и от вида функциональной связи.

В табл. 4 приведены формулы определения абсолютной и относительной погрешностей для различного вида функциональных связей величины a , измеренной косвенно, с величинами X, Y и Z , которые измерены непосредственно.

3.2. Выбор средств измерений

К средствам измерений, которые используют в сфере производства и обращения, предъявляются законодательные, технические и метрологические требования.

К **законодательным требованиям** относят требования обязательности утверждения типа, поверки и оформления и представления их результатов (в том числе клеймения СИ). При применении СИ должны соблюдаться обязательные требования к условиям эксплуатации.

К **техническим требованиям** относят требования к конструкции, составным частям, программному обеспечению, условиям монтажа и эксплуатации СИ.

К **метрологическим требованиям** относят установление диапазона измерений и предела допускаемой погрешности измерений СИ, т.е. наибольшей погрешности СИ, при которой она может быть допущена к применению.

При выборе средств измерений учитывают совокупность метрологических (цена деления, погрешность, пределы измерений, измерительное усилие), эксплуатационных и экономических показателей, к которым относятся: массовость (повторяемость измеряемых размеров) и доступность их для контроля; стоимость и надежность средства измерения; метод измерения; время, затрачиваемое на настройку и процесс измерения; масса, габаритные размеры, рабочая нагрузка; жесткость объекта контроля, шероховатость его поверхности; режим работы и т. д.

Основная трудность технико-экономического подхода при выборе СИ заключается в том, что сам процесс измерения не сопровождается непосредственным созданием материальных ценностей.

Комплексность задачи выбора средств измерения определила необходимость разработки различных способов выбора средств измерения. Прежде всего, выбранное средство измерения должно со-

ответствовать по своей конструкции и габаритам параметрам измеряемой детали.

В массовом производстве основными средствами измерения являются высокопроизводительные механизированные и автоматизированные средства измерения и контроля.

В серийном производстве основными средствами измерения и контроля служат предельные калибры, шаблоны, специальные контрольные приспособления и при необходимости - универсальные средства измерения.

В мелкосерийном и индивидуальном производстве основными являются универсальные средства измерения.

По метрологическим характеристикам выбираемыми параметрами средств измерений являются предельная погрешность измерения (ее часто называют пределом допускаемой погрешности), а также цена деления шкалы измерительного средства.

В соответствии с требованиями ГОСТ 8.051-81 установлены соотношения между заданными допусками на измеряемые (контролируемые) размеры определенного номинального размера и качества и допускаемыми погрешностями измерения, определяющими действительный размер измеряемой величины.

Цена деления шкалы выбирается с учетом заданной точности измерения. Например, если размер задан с точностью до 0,01 мм, то прибор выбирается с ценой деления шкалы 0,01 мм. Принятие более грубой шкалы вносит дополнительные субъективные погрешности, а более точной - удорожает средство измерения.

При контроле технологических процессов используют средства измерения с ценой деления не более 1/6 допуска на изготовление.

Главным фактором при выборе средства измерения является допускаемая погрешность измерения.

При решении комплексной задачи выбора средств измерения, помимо технических параметров, решается задача по обеспечению минимальных затрат.

Чем ближе значение предельной погрешности измерительного средства к значению допускаемой погрешности измерения, тем менее трудоемким и более дешевым будет измерение.

Значения размеров, полученных при измерении с погрешностью, не превышающей допускаемую погрешность измерения, принимают за действительные.

3.3. Единство измерений. Эталоны и их классификация

Для того чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разное время, с использованием различных методов и средств измерений, а также в разных по территориальному расположению местах, необходимо единство измерений.

Под **единством измерений** понимается характеристика качества измерений, заключающаяся в том, что их результаты выражаются в законных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам воспроизведенных величин, а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы.

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых проградуированы все средства измерения одной и той же физической величины. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения установленных единиц физических величин и передачи их размеров применяемым средствам измерения.

Воспроизведение, хранение и передача размеров единиц осуществляются с помощью эталонов и образцовых средств измерения. Высшим звеном в метрологической цепи передачи размеров единиц измерений являются эталоны.

Эталон - это средство измерения (или комплекс средств измерения), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы физической величины (или одну из этих функций) с целью передачи размера единицы образцовым, а от них - рабочим средствам измерения и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

Эталон должен обладать взаимосвязанными свойствами:

- **воспроизводимость** - возможность воспроизведения единицы физической величины (на основе ее теоретического определения) с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники;

- **неизменность** - свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени;

- **сличаемость** - свойство эталона, предполагающее, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличения.

По своему метрологическому назначению эталоны делят на первичные и специальные.

Первичный эталон воспроизводит единицу с наивысшей в стране точностью в соответствии с ее определением. Первичные эталоны со-

ставляют основу государственной системы обеспечения единства измерений.

Специальный эталон обеспечивает воспроизведение единицы физической величины в особых условиях, в которых прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью неосуществима, и для этих условий заменяет первичный эталон.

Первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны, называется **государственным эталоном** (прил. 4). Его утверждение проводит Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Государственные эталоны создаются, хранятся и применяются центральными метрологическими научными институтами страны. В состав государственных эталонов включаются средства измерения, с помощью которых хранят и воспроизводят размер единицы физической величины с точностью, которая должна соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять потребностям науки и техники, а также средства измерения, с помощью которых контролируют условия измерений и неизменность воспроизводимого или хранимого размера единицы и осуществляют передачу размера единицы. Государственные эталоны России периодически сличаются с государственными эталонами других стран.

Значения *вторичных эталонов* устанавливают по первичным эталонам. В метрологической практике они широко распространены. Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размера. Они создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ и для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона.

Вторичные эталоны подразделяются на три вида: эталон-копия, эталон сравнения, эталон-свидетель.

Эталон-копия предназначен для передачи размера единицы **рабочим эталонам**.

Рабочий эталон применяется для передачи размера единицы **рабочим средствам измерений**. Эталон-копия представляет собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению, поэтому он всегда является его физической копией.

Эталон сравнения применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом.

Эталон-свидетель предназначен для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты.

Государственные эталоны всегда осуществляются в виде комплекса средств измерений и вспомогательных устройств, обеспечивающих воспроизведение единицы и, в необходимых случаях, ее хранение, а также передачу размера единицы вторичным эталонам. Вторичные же эталоны могут осуществляться в виде комплекса средств измерений, одиночных эталонов, групповых эталонов, наборов.

Эталонная база России имеет около 120 государственных эталонов и более 250 вторичных эталонов единиц физических величин, размещенных в ведущих метрологических научно-исследовательских институтах страны (прил. 4).

Кроме национальных эталонов единиц физических величин существуют **международные эталоны**, которые хранятся в Международном бюро мер и весов. Программой деятельности этого бюро предусмотрены систематические сличения национальных эталонов крупнейших метрологических лабораторий разных стран с международными эталонами и между собой.

Обеспечение правильной передачи размера единиц физических величин (и, как следствие, обеспечение единства измерений) во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем.

Поверочная схема - нормативный документ, который устанавливает соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим средствам измерений (с указанием методов и погрешности при передаче). Различают государственные и локальные поверочные схемы.

Первичный эталон ↓	
Вторичный эталон ↓	
Рабочие эталоны 1-го разряда → ↓	Рабочие СИ высшей точности
Рабочие эталоны 2-го разряда → ↓	Рабочие СИ высокой точности
Рабочие эталоны 3-го разряда → ↓	Рабочие СИ повышенной точности
Рабочие эталоны 4-го разряда → ↓	Рабочие СИ нормальной точности
Рабочие эталоны 5-го разряда →	Технические СИ

Рис. 6. Государственная схема передачи единиц измерения физических величин от эталонов к образцовым и рабочим средствам измерений

Государственная поверочная схема передачи единиц измерения физических величин от эталонов к образцовым и рабочим средствам измерений представлена на рис. 6.

Согласно представленной схеме между разрядами рабочих эталонов существует соподчиненность: рабочие эталоны 1-го разряда поверяются, как правило, непосредственно по вторичным эталонам, рабочие эталоны 2-го и последующих разрядов подлежат поверке по рабочим эталонам непосредственно предшествующих разрядов.

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Погрешности многократных измерений

Результаты измерения должны быть выражены в единицах величин, допущенных к применению.

Результат измерения оформляется в виде записи измеренной величины с указанием абсолютной погрешности измерения.

Абсолютная погрешность технического измерения равна абсолютной погрешности прибора, которая определяется исходя из класса точности прибора.

Класс точности прибора характеризуется приведенной погрешностью прибора, выраженной отношением абсолютной погрешности средства измерений к условно принятому значению величины X_N , которое называют нормирующим:

$$\gamma = \Delta X / X_N.$$

Приведенные погрешности позволяют сравнивать по точности средства измерений, имеющие разные пределы измерений, если абсолютные погрешности каждого из них не зависят от значения измеряемой величины.

Абсолютная погрешность, которую дает прибор, определяется из выражения

$$\Delta X = \gamma X_N / 100,$$

где γ - класс точности прибора;

X_N - предельное значение измеряемой величины по шкале прибора.

Если на шкале класс точности не обозначен, то абсолютная погрешность прибора принимается равной половине цены деления наименьшего значения шкалы прибора.

Погрешности приборов не зависят от числа измерений, они зависят от конструкции прибора. Для более точных измерений либо подбирают

приборы более высокого класса точности, либо используют лабораторные методы измерений.

При лабораторных методах измерение производят n раз и получают n приближенных значений: x_1, x_2, \dots, x_n .

При многократных измерениях физической величины x в одинаковых условиях возникают *случайные погрешности* - ошибки, которые вызываются большим числом не поддающихся учету случайных причин. Случайные погрешности подчиняются законам теории вероятностей.

В основе теории ошибок, применяющей методы теории вероятностей, лежат 2 положения:

- случайные погрешности одинаковой величины, но разного знака равновероятны, т.е. встречаются одинаково часто;
- чем больше абсолютная величина погрешности, тем она менее вероятна, т.е. встречается значительно реже, чем малые по абсолютной величине погрешности.

Из этих положений следует, что истинное значение измеряемой величины при многократных измерениях приблизительно равно среднеарифметическому значению из этого числа измерений:

$$x \approx \bar{x}.$$

При наличии случайных погрешностей появление в процессе измерения любого значения x является случайным событием. Существует некоторая вероятность того, что это значение x появится в интервале $[x - \Delta x; x + \Delta x]$. Знаки "+" и "-" в выражении означают, что погрешность может быть допущена как в сторону увеличения от действительного значения измеряемой величины, так и в сторону уменьшения.

Пусть y - случайная ошибка измерения величины x :

$$y = \Delta x = \bar{x} - x_i$$

Эта ошибка является непрерывной случайной величиной, которая подчиняется закону нормального распределения Гаусса:

$$\varphi(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}},$$

где σ^2 - постоянная величина, называемая **дисперсией распределения**.

Дисперсия характеризует разброс случайных величин y , так как является параметром кривой распределения (рис. 7). При большой дисперсии кривая расплывается, максимум становится выраженным менее ярко, более вероятны большие отклонения.

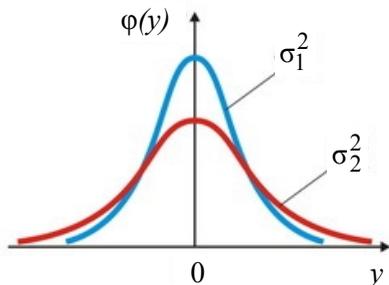


Рис. 7. Кривая нормального распределения (σ_1) и кривая распределения Стьюдента (σ_2)

Кривая распределения Стьюдента по сравнению с кривой нормального распределения более пологая и имеет меньшее значение max.

При большом числе измерений $n \rightarrow \infty$ (практически при $n > 30$) дисперсия σ оказывается приблизительно равной среднеквадратичной погрешности отдельного измерения. Чем меньше значение σ , тем точнее проведено измерение.

При обработке результатов измерений в качестве предельной абсолютной погрешности отдельного измерения обычно берут величину 3σ . Измерение считается промахом, если его абсолютная погрешность больше 3σ .

Доверительным интервалом называют интервал $[x-\Delta x; x+\Delta x]$, в котором содержится истинное значение x измеряемой величины.

Обычно в лабораторных работах при небольшом числе измерений выбирается достаточная надежность 0,95.

Таблица 5

Коэффициент Стьюдента $t(\alpha, n)$

n	Надежность α							
	0,5	0,386	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	1,00	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	63,7
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	9,0
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	5,8
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	4,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	4,0
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	3,7
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	3,5
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	3,4
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	3,3
11	0,70	0,88	1,1	2,4	1,8	2,2	2,8	3,2

Существует специальная таблица коэффициентов Стьюдента, с помощью которых можно установить, во сколько раз следует увеличить стандартный интервал $[\pm S_x]$, чтобы при определенном числе измерений получить заданную надежность α (табл. 5).

4.2. Обработка результатов прямых многократных измерений

Необходимость выполнения прямых многократных измерений устанавливается в конкретных методиках измерений.

Результаты измерения должны быть выражены в единицах величин, допущенных к применению.

Результат измерения оформляется в виде записи измеренной величины с указанием абсолютной погрешности измерения.

Методы обработки результатов прямых многократных измерений изложены в ГОСТ Р 8.736-2011.

Примечание: в данной работе рассмотрена обработка результатов измерений с учетом случайных погрешностей (не рассматриваются варианты измерений при наличии систематических погрешностей).

В ГОСТе применены следующие термины с соответствующими определениями.

Группа результатов измерений величин - несколько результатов измерений (не менее четырех, $n \geq 4$), полученных при измерениях одной и той же величины, выполненных с одинаковой тщательностью, одним и тем же средством измерений, одним и тем же методом и одним и тем же оператором. **Под многократными измерениями** понимают не менее четырех измерений.

Погрешность измерения - разность между результатом измерения величины и действительным (опорным) значением величины.

Случайная погрешность измерения - случайная погрешность, составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же величины, проведенных с одинаковой тщательностью.

Грубая погрешность измерения: погрешность измерения, существенно превышающая зависящие от объективных условий измерений значения систематической и случайной погрешностей.

При статистической обработке группы результатов прямых многократных независимых измерений выполняют следующие операции:

- исключают известные систематические погрешности из результатов измерений;

- вычисляют оценку измеряемой величины;
- вычисляют среднее квадратическое отклонение результатов измерений;
- проверяют наличие грубых погрешностей и при необходимости исключают их;
- проверяют гипотезу о принадлежности результатов измерений нормальному распределению; в ГОСТе проверку гипотезы о принадлежности результатов измерений нормальному распределению рассматривают при числе результатов измерений $15 < n \leq 50$ (приложение Б) и $n > 50$ (приложение В);
- вычисляют доверительные границы случайной погрешности (доверительную случайную погрешность) оценки измеряемой величины;
- вычисляют доверительные границы погрешности оценки измеряемой величины.

При числе результатов измерений $n \leq 15$ принадлежность их к нормальному распределению не проверяют. При этом вычисление доверительных границ случайной погрешности оценки измеряемой величины по методике, предусмотренной настоящим стандартом, допускается только в том случае, если заранее известно, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению.

Примечание: если не известно распределение погрешностей оценки искомой величины, способы нахождения доверительных границ случайной погрешности могут быть указаны в методике измерений с учетом того, что подобные измерения повторяют.

1. Оценку измеряемой величины \bar{x} , за которую принимают среднее арифметическое значение *исправленных* результатов измерений, вычисляют по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где x_i - i -й результат измерений;

n - число результатов измерений.

2. Среднее квадратическое отклонение S группы, содержащей результаты измерений, вычисляют по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}.$$

Для обработки результатов удобно использовать следующую таблицу:

	x_i	$ x_i - \bar{x} $	$ x_i - \bar{x} ^2$
1	x_1	$ x_1 - \bar{x} $	$ x_1 - \bar{x} ^2$
2	x_2	$ x_2 - \bar{x} $	$ x_2 - \bar{x} ^2$
3	x_3	$ x_3 - \bar{x} $	$ x_3 - \bar{x} ^2$
n	x_n	$ x_n - \bar{x} $	$ x_n - \bar{x} ^2$

3. Для исключения грубых погрешностей используют критерий Граббса. Статистический критерий Граббса исключения грубых погрешностей основан на предположении о том, что группа результатов измерений принадлежит нормальному распределению. Для этого вычисляют критерии Граббса G_1 и G_2 , предполагая, что наибольший x_{\max} или наименьший x_{\min} результат измерений вызван грубыми погрешностями:

$$G_1 = \frac{|x_{\max} - \bar{x}|}{S}; \quad G_2 = \frac{|\bar{x} - x_{\min}|}{S}.$$

Сравнивают G_1 и G_2 с теоретическим значением G_T критерия Граббса при выбранном уровне значимости q . Таблица критических значений критерия Граббса приведена в приложении ГОСТ Р 8.736-2011.

Если $G_1 > G_T$, то x_{\max} исключают как маловероятное значение. Если $G_2 > G_T$, то x_{\min} исключают как маловероятное значение.

Далее вновь вычисляют среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения ряда результатов измерений и процедуру проверки наличия грубых погрешностей повторяют.

Если $G_1 \leq G_T$, то x_{\max} не считают промахом и его сохраняют в ряду результатов измерений. Если $G_2 \leq G_T$, то x_{\min} не считают промахом и его сохраняют в ряду результатов измерений (табл. 6).

4. Среднее квадратическое отклонение *среднего арифметического* (оценки измеряемой величины) вычисляют по формуле

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{n}}.$$

5. По табл. 5 в зависимости от заданной надежности и числа измерений n находят коэффициент Стьюдента $t(a, n)$.

6. Абсолютную погрешность результата серии измерений, т.е. полуширину доверительного интервала, определяют по формуле

$$\Delta x = t(a, n)S_x.$$

Критические значения G_T для критерия Граббса

n	Одно наибольшее или одно наименьшее значение при уровне значимости q	
	Свыше 1 %	Свыше 5 %
3	1,155	1,155
4	1,496	1,481
5	1,764	1,715
6	1,973	1,887
7	2,139	2,020
8	2,274	2,126
9	2,387	2,215
10	2,482	2,290
11	2,564	2,355
12	2,636	2,412
13	2,699	2,462
14	2,755	2,507
15	2,806	2,549

7. Окончательный результат записывают в виде:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x.$$

Это означает, что истинное значение измеряемой величины находится в доверительном интервале $[x - \Delta x; x + \Delta x]$ с надежностью a .

Правила округления при обработке результатов измерений

Оформление записи оценок измеряемых величин проводят в соответствии с правилами по межгосударственной стандартизации.

Числовое значение оценки измеряемой величины должно оканчиваться цифрой того разряда, что и значение погрешности Δ .

При симметричных доверительных границах погрешности оценку измеряемой величины представляют в форме

$$\bar{x} \pm \Delta P,$$

где \bar{x} - оценка измеряемой величины.

Округление при обработке результатов измерений выполняют в соответствии с прил. Е. - ГОСТ Р 8.736-2011.

Согласно прил. Е (обязательное):

1. Точность результатов измерений и точность вычислений при обработке результатов измерений должны быть согласованы с требуемой точностью получаемой оценки измеряемой величины.

2. Погрешность оценки измеряемой величины следует выражать не более чем двумя значащими цифрами. Две значащие цифры в погрешности оценки измеряемой величины сохраняют:

- при точных измерениях;
- если первая значащая цифра не более трех.

3. Число цифр в промежуточных вычислениях при обработке результатов измерений **должно быть на две больше**, чем в окончательном результате.

4. Погрешность при промежуточных вычислениях должна быть выражена не более чем тремя значащими цифрами.

5. Сохраняемую значащую цифру в погрешности оценки измеряемой величины при округлении увеличивают на единицу, если отбрасываемая цифра неукзываемого младшего разряда больше либо равна пяти, и не изменяют, если она меньше пяти.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Шкала Мбоса

Балл	Эталонный минерал	Абсолютная твердость	Обрабатываемость
1	Тальк ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)	1	Царапается ногтем
2	Гипс ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	3	Царапается ногтем
3	Кальцит ($CaCO_3$)	9	Царапается медью
4	Флюорит (CaF_2)	21	Легко царапается ножом, оконным стеклом
5	Апатит	48	С усилием царапается ножом, оконным стеклом
6	Ортоклаз ($KAlSi_3O_8$)	72	Царапает стекло Обрабатывается напильником
7	Кварц (SiO_2)	100	Поддается обработке алмазом Царапает стекло
8	Топаз	200	Поддается обработке алмазом Царапает стекло
9	Корунд (Al_2O_3)	400	Поддается обработке алмазом Царапает стекло
10	Алмаз (C)	1600	Царапает стекло

Шкала Мбоса (минералогическая шкала твердости) - набор эталонных минералов для определения относительной твердости методом царапания. В качестве эталонов приняты 10 минералов, расположенных в порядке возрастающей твердости. Предложена в 1811 г. немецким минералогом Фридрихом Моосом. Значения шкалы от 1 до 10 соответствуют 10 достаточно распространенным минералам от талька до алмаза. Твердость минерала измеряется путем поиска самого твердого эталонного минерала, который он может поцарапать, и/или самого мягкого эталонного минерала, который царапает данный минерал.

Шкала Мбоса предназначена для грубой сравнительной оценки твердости материалов по системе мягче-тверже. Испытываемый материал либо царапает эталон и его твердость по шкале Мбоса выше, либо царапается эталоном и его твердость ниже эталона. Таким образом, шкала Мооса информирует только об относительной твердости минералов.

В таблице приведено сравнение твердости по шкале Мбоса с абсолютной твердостью, измеренной склерометром. Например, корунд (9) в 2 раза тверже топаза (8), но при этом в 4 раза менее твердый, чем алмаз (10).

Помимо шкалы Мбоса, есть и другие методы определения твердости, но различные шкалы твердости нельзя однозначно соотнести друг с другом. Практикой приняты несколько более точных систем измерения твердости материалов, ни одна из которых не покрывает весь спектр шкалы Мбоса.

Шкала Рихтера

Сейсмическая шкала (схематизировано)

Балл	Название землетрясения	Краткая характеристика
1	Незаметное	Отмечается только сейсмическими приборами
2	Очень слабое	Ощущается отдельными людьми, находящимися в состоянии полного покоя
3	Слабое	Ощущается лишь небольшой частью населения
4	Умеренное	Распознается по легкому дребезжанию и колебанию предметов, посуды и оконных стекол, скрипу дверей и стен
5	Довольно сильное	Общее сотрясение зданий, колебание мебели Трещины в оконных стеклах и штукатурке Пробуждение спящих
6	Сильное	Ощущается всеми. Картины падают со стен Откалываются куски штукатурки, легкое повреждение зданий
7	Очень сильное	Трещины в стенах каменных домов Анטיсейсмические, а также деревянные постройки остаются невредимыми.
8	Разрушительное	Трещины на крутых склонах и на сырой почве Меняется уровень воды в колодцах. Памятники сдвигаются с места или опрокидываются. Падают дымовые трубы. Сильно повреждаются капитальные здания
9	Опустошительное	Сильное повреждение и разрушение каменных домов
10	Уничтожающее	Крупные трещины в почве. Оползни и обвалы Разрушение каменных построек. Искривление ж.-д. рельсов
11	Катастрофа	Широкие трещины в земле. Многочисленные оползни и обвалы. Каменные дома совершенно разрушаются
12	Сильная катастрофа	Изменения в почве достигают огромных размеров Многочисленные трещины, обвалы, оползни Возникновение водопадов, подпруд на озерах, отклонение течения рек. Ни одно сооружение не выдерживает. На земной поверхности видны волны

Приложение 3

Сила ветра в баллах по шкале Бофорта и морское волнение

Баллы	Сила ветра	Скорость ветра	Действие ветра	
		$\frac{\text{м/с}}{\text{км/ч}}$	на суше	на море
1	2	3	4	5
0	Штиль	$0 - 0,02$ Менее 1	Полное отсутствие ветра. Дым поднимается вертикально, листья деревьев неподвижны	Волнение отсутствует Зеркально гладкое море
1	Тихий	$0,3 - 1,5$ 2 - 5	Дым слегка отклоняется от вертикального направления, листья деревьев неподвижны	Слабое волнение На море легкая рябь, пены на гребнях нет. Высота волн 0,1 м, длина 0,3 м
2	Легкий	$1,6 - 3,3$ 6 - 11	Ветер чувствуется лицом, листья временами слабо шелестят, флюгер начинает двигаться	Слабое волнение, гребни не опрокидываются и кажутся стекловидными. На море короткие волны
3	Слабый	$3,4 - 5,4$ 12 - 19	Листья и тонкие ветки деревьев с листвой непрерывно колеблются, колышутся легкие флаги. Дым как бы слизывается с трубы (при скорости > 4 м/с)	Легкое волнение. Короткие, хорошо выраженные волны. Гребни, опрокидываясь, образуют стекловидную пену, изредка образуются маленькие белые барашки. Средняя высота волн 0,6-1 м, длина 6 м
4	Умеренный	$5,5 - 7,9$ 20 - 28	Ветер поднимает пыль, бумажки. Качаются тонкие ветви деревьев и без листвы. Дым перемешивается в воздухе, теряя форму. Это лучший ветер для работы обычного ветрогенератора (при диаметре ветроколеса 3-6 м)	Умеренное волнение. Волны удлиненные, белые барашки видны во многих местах, Высота волн 1-1,5 м, длина 15 м. Достаточная ветровая тяга для виндсерфинга(на доске под парусом), с возможностью выйти в режим глиссирования (при ветре не менее 6-7 м/с)

1	2	3	4	5
5	Свежий	$\frac{8,0 - 10,7}{29 - 38}$	Качаются ветки и тонкие стволы деревьев, ветер чувствуется рукой, вытягивает большие флаги Свистит в ушах	Неспокойное море Хорошо развитые в длину, но не очень крупные волны, повсюду видны белые барашки (в отдельных случаях образуются брызги). Высота волн 1,5 - 2 м, длина 30 м
6	Сильный	$\frac{10,8 - 13,8}{39 - 49}$	Качаются толстые сучья деревьев, тонкие деревья гнутся, гудят телеграфные провода, зонтики используются с трудом	Крупное волнение Начинают образовываться крупные волны. Белые пенистые гребни занимают значительные площади. Образуется водяная пыль. Высота волн 2-3 м, длина 50 м.
7	Крепкий	$\frac{13,9 - 17,1}{50 - 61}$	Качаются стволы деревьев, гнутся большие ветки, трудно идти против ветра	Сильное волнение Волны громоздятся, гребни срываются, пена ложится полосами по ветру. Высота волн 3 - 5 м, длина 70 м
8	Очень крепкий	$\frac{17,2 - 20,7}{62 - 74}$	Ломаются тонкие и сухие сучья деревьев, говорить на ветру нельзя, идти против ветра очень трудно	Очень сильное волнение Умеренно высокие, длинные волны. По краям гребней начинают взлетать брызги. Полосы пены ложатся рядами по направлению ветра Высота волн 5-7 м, длина 100 м
9	Шторм	$\frac{20,8 - 24,4}{75 - 88}$	Гнутся большие деревья, ломаются большие ветки С крыш сдувает черепицу	Очень сильное волнение Высокие волны. Пена широкими плотными полосами ложится по ветру. Гребни волн начинают опрокидываться и рассыпаться в брызги, которые ухудшают видимость. Высота волн 7 - 8 м, длина 150 м.
10	Сильный шторм	$\frac{24,5 - 28,4}{89 - 102}$	На суше бывает редко Значительные разрушения строений, ветер валит деревья и вырывает их с корнем	Очень сильное волнение Очень высокие волны с длинными загибающимися вниз гребнями. Пена выдувается ветром большими хлопьями в виде густых белых полос. Поверхность

1	2	3	4	5
				моря белая от пены. Сильный грохот волн подобен ударам. Видимость плохая. Высота волн 8-11 м, длина 200 м
11	Жестокий шторм	$\frac{28,5 - 32,6}{103 - 117}$	Наблюдается очень редко. Сопровождается большими разрушениями на значительных пространствах	Исключительно высокие волны. Суда небольшого и среднего размера временно скрываются из вида. Море все покрыто длинными белыми хлопьями пены, располагающимися по ветру. Края волн повсюду сдуваются в пену. Видимость плохая. Высота волн 11 м, длина 250 м
12	Ураган	$\frac{> 32,6}{> 117}$	Опустошительные разрушения. Отдельные порывы ветра достигают скорости 50-60 м/с. Ураган может случиться перед сильной грозой	Исключительное волнение. Воздух наполнен пеной и брызгами. Море покрыто полосами пены. Очень плохая видимость. Высота волн >11 м, длина 300 м

Шкала Бофорта - условная шкала для визуальной оценки и записи силы (скорости) ветра в баллах. Первоначально была разработана английским адмиралом Френсисом Бофортом в 1806 г. для определения силы ветра на море. С 1874 г. принята для повсеместного (на суше и на море) использования в международной синоптической практике. В последующие годы менялась и уточнялась. За ноль баллов было принято состояние полного штиля на море.

В таблице приведена шкала Бофорта, принятая в 1963 г. Всемирной метеорологической организацией. Шкала волнения на море - девятибалльная (параметры даны для большой морской акватории; на малых акваториях волнение меньше).

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ ЭТАЛОННАЯ БАЗА
(выборка)**

Перечень государственных эталонов России по состоянию на 15.07.2006 г. ГПЭ - государственный первичный эталон ГСЭ - государственный специальный эталон			
№ п/п	№ реестра	Наименование эталона	Институт
1	ГЭТ 1-98	ГПЭ времени и частоты и шкал времени в составе Единого эталона единиц времени, частоты и длины	ВНИИФТРИ
2	ГЭТ 2-85	ГПЭ единицы длины	ВНИИМ им. Д.И.Менделеева
3	ГЭТ 3-78	ГПЭ единицы массы	ВНИИМ им. Д.И.Менделеева
4	ГЭТ 4-91	ГПЭ единицы силы постоянного электрического тока	ВНИИМ им. Д.И.Менделеева
5	ГЭТ 5-2003	ГПЭ единицы силы света и светового потока непрерывного излучения	ВНИИОФИ
6	ГЭТ 6-95	ГПЭ единиц активности радионуклидов, потока и плотности потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников	ВНИИМ им. Д.И.Менделеева
7	ГЭТ 22-80	ГПЭ единицы плоского угла	ВНИИМ им. Д.И.Менделеева
8	ГЭТ 23-79	ГПЭ единицы давления	ВНИИМ им. Д.И.Менделеева
9	ГЭТ 32-72	ГПЭ единицы силы	ВНИИМ им. Д.И.Менделеева
10	ГЭТ 34-92	ГПЭ единицы температуры	ВНИИМ им. Д.И.Менделеева
11	ГЭТ 35-91	ГПЭ единицы температуры в диапазоне 0,8 - 273,16 К	ВНИИФТРИ

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 8.401-80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Основные положения.
2. ГОСТ 8.417-2002 ГСИ. Единицы величин.
3. РГМ 29-99 Метрология. Основные термины и определения.
4. ГОСТ Р 8.736-2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
5. *Андропова И.А., Невмержицкая Я.В.* Стандартизация, метрология, сертификация: практикум : учеб. пособие. - Тюмень : ТюмГНГУ, 2008.
6. *Вакорин Д.В.* Метрология, стандартизация и сертификация : учеб. пособие. - Тюмень : Изд-во ТГУ, 2010.
7. *Казанцева Н.К.* Основы метрологии : учеб. пособие. - Екатеринбург : УГЛТУ, 2010.
8. *Лифиц И.М.* Стандартизация, метрология и подтверждение соответствия : учебник для бакалавров. - 10-е изд., перераб. и доп. - М. : Юрайт, 2012 (рекомендовано МО РФ).

Учебное издание

**ИЗМЕРЕНИЯ
ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ
ИЗМЕРЕНИЙ**

*Методическая разработка
для практических занятий*

Составитель канд. техн. наук, доцент В.Г. Уланов

Руководитель издательской группы О.В. Егорова
Редактор Т.В. Федулова
Технический редактор Т.Ю. Курноскина
Корректор С.Л. Бренер
Компьютерная верстка - Д.Т. Джумаева

Подписано в печать 17.09.2015. Формат 60x84/16.
Бум. офсетная. Гарнитура "Times New Roman". Печать оперативная.
Усл. печ. л. 3,02 (3,25). Уч.-изд. л. 3,38. Заказ №

Самарский государственный экономический университет.
443090, Самара, ул. Советской Армии, 141.

