



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РЕДАКЦИОННЫЙ
С О В Е Т**

Председатель
Л.А. ПУЧКОВ

Зам. председателя
Л.Х. ГИТИС

Члены редсовета
И.В. ДЕМЕНТЬЕВ

А.П. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

В.В. КУРЕХИН

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

*ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА*

*ректор МГГУ,
чл.-корр. РАН*

*директор
Издательства МГГУ*

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

**Я.М. РАДКЕВИЧ
А.Г. СХИРТЛАДЗЕ
Б.И. ЛАКТИОНОВ**

МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Допущено Учебно-методическим объединением по образованию в области автоматизированного машиностроения в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров "Технологии, оборудование и автоматизация машиностроительных производств" и специальностям: "Технология машиностроения"; "Металлообрабатывающие станки и комплексы"; "Инструментальные системы машиностроительных производств" (направление подготовки дипломированных специалистов — "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств"); "Автоматизация технологических процессов и производств (в машиностроении)" (направление подготовки дипломированных специалистов — "Автоматизированные технологии и производства")

МОСКВА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

2 0 0 3



УДК 389.14+658.516+621.753.1.3

ББК 30.10

Р 15

Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением по образованию в области автоматизированного машиностроения (гриф выдан 26.11.2001 г., письмо № 130/55)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ПРОГРАММА КНИГОИЗДАНИЯ РОССИИ

Рецензенты:

- кафедра «Измерительные информационные системы и технологии» МГТУ «Станкин» (зав. кафедрой, проф., д-р техн. наук *В.И. Телешевский*);
- кафедра «Технология машиностроения и робототехнических комплексов» Белгородской государственной академии строительных материалов (зав. кафедрой, проф., д-р техн. наук *А.А. Погонин*);
- проф., д-р техн. наук *В.В. Алексеев* (Московский государственный геологоразведочный университет, кафедра «Механизация и автоматизация горных и геологоразведочных работ»)

Радкевич Я.М., Схиртладзе А.Г., Лактионов Б.И.

Р 15 Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник для вузов. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. — 788 с. : ил.
ISBN 5-7418-0201-X (в пер.)

Рассмотрены вопросы метрологии как науки об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Приведены важнейшие сведения о физических величинах и единицах их измерения, методах математической обработки результатов измерений, положения Государственной системы стандартизации, унификации и агрегатирования, комплексной и опережающей стандартизации, основные понятия в области оценки качества продукции, принципы построения системы допусков и посадок, основные нормы взаимозаменяемости типовых соединений деталей машин. Изложены методы обоснования требований к точности основных сопряжений, стандартизации геометрических параметров деталей, организационные, научно-технические и нормативно-методические основы сертификации продукции и услуг.

Для студентов высших учебных заведений. Представляет интерес для широкого круга специалистов.

УДК 389.14+658.516+621.753.1.3

ББК 30.10

ISBN 5-7418-00201-X

© Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе,
Б.И. Лактионов, 2003

© Издательство МГГУ, 2003

© Дизайн книги.

Издательство МГГУ, 2003

РАЗДЕЛ 1

МЕТРОЛОГИЯ

Метрология возникла как наука о различных мерах и соотношениях между ними. Слово метрология образовано из двух греческих слов: $\mu\epsilon\tau\rho\nu$ — мера и $\lambda\omicron\gamma\omicron\zeta$ — учение, что буквально можно перевести как «учение о мерах».

Измерения являются одним из важнейших путей познания природы, дают количественную характеристику окружающего нас мира, помогают раскрыть действующие в природе закономерности. Д. И. Менделеев, подчеркивая значение измерений для науки, писал: «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять... точная наука немислима без меры».

Измерения имеют большое значение в современном обществе. Они дают возможность обеспечить взаимозаменяемость узлов и деталей, безопасность труда, позволяют совершенствовать технологию и повышать качество продукции.

Круг величин, подлежащих измерению, определяется разнообразием явлений, с которыми приходится сталкиваться человеку, например, измерения длины, площади, объема, массы, механических, тепловых, электрических, световых и других величин.

Сравнение опытным путем измеряемой величины с другой, подобной ей, принятой за единицу, составляет общую основу любых измерений.

Разделом науки, изучающей измерения, является *метрология*.

Метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

В метрологии решаются следующие основные задачи: разработка общей теории измерений единиц физических величин и их систем, методов и средств измерений, методов определения точности измерений, основ обеспечения единства и единообразия средств измерений, эталонов и образцовых средств измерений, методов передачи размеров единиц от эталонов и образцовых средств измерений к рабочим средствам измерений.

Решение многих задач метрологии является важной государственной задачей. Например, во многих странах мира мероприятия по обеспечению единства и требуемой точности измерений установлены законодательно, узаконены единицы измерений, регламентировано проведение регулярной поверки мер и измерительных приборов, находящихся в эксплуатации, порядок испытаний и аттестации вновь выпускаемых средств измерений.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Технологическая деятельность человека связана с измерением различных физических величин.

Физическая величина — это характеристика одного из свойств физического объекта (явления или процесса), общая в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальная для каждого объекта.

Значение физической величины — это оценка ее величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц или числа по принятой для нее шкале. Например, 120 мм — значение линейной величины; 75 кг — значение массы тела, НВ190 — число твердости по Бринеллю.

Измерением физической величины называют совокупность операций, выполняемых с помощью технического средства, хранящего единицу, или воспроизводящую шкалу физической величины. Эти операции заключаются в сравнении (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей или шкалой с целью получения значения этой величины в форме, наиболее удобной для использования.

В теории измерений принято, в основном, пять типов шкал: наименования, порядка, интервалов, отношений и абсолютная.

Шкала наименований характеризуется только отношением эквивалентности. По своей сути она является качественной, не содержит нуля и единицы измерения. Примером такой шкалы является оценка цвета по наименованиям (атласы цветов), и так как каждый цвет имеет множество вариаций, то такое сравнение может выполнить только опытный эксперт, обладающий соответствующими зрительными возможностями.

Шкала порядка характеризуется отношением эквивалентности и порядка. Для практического использования такой шкалы необходимо установить ряд эталонов. Классификация объектов осуществляется сравнением интенсивности оцениваемого свойства с его эталонным значением. К шкалам порядка относятся, например, шкала землетрясений, шкала силы ветра, шкала твердости тел и т. п.

Шкала разностей отличается от шкалы порядка тем, что кроме отношений эквивалентности и порядка добавляется эквивалентность интервалов (разностей) между различными количественными проявлениями свойства. Она имеет условные нулевые значения, а величина интервалов устанавливается по согласованию. Характерным примером такой шкалы является шкала интервалов времени. Интервалы времени можно суммировать (вычитать).

Шкала отношений описывает свойства, к которым применимы отношения эквивалентности, порядка и суммирования, а следовательно, вычитания и умножения. Эти шкалы имеют естественное нулевое значение, а единицы измерений устанавливаются по согласованию. Для шкалы отношений достаточно одного эталона, чтобы распределить все исследуемые объекты по интенсивности измеряемого свойства. Примером шкалы отношений является шкала массы. Масса двух объектов равна сумме масс каждого из них.

Абсолютная шкала обладает всеми признаками шкалы отношений, но дополнительно в ней существует естественное однозначное определение единицы измерения. Такие шкалы соответствуют относительным величинам (отношениям одноименных физических величин, описываемых шкалами отношений). Среди абсолютных шкал выделяются шкалы, значения которых находятся в пределах 0—1. Такой величиной является, например, коэффициент полезного действия.

Большинство свойств, которые рассматривают в метрологии, описываются одномерными шкалами. Однако имеются свойства, описание которых может быть выполнено только с применением многомерных шкал. Например, трехмерные шкалы цвета в колориметрии.

Практическая реализация шкал конкретных свойств достигается путем стандартизации единиц измерений, шкал и (или) способов и условий их однозначного воспроизведения. Поня-

тие неизменной для любых точек шкалы единицы измерений имеет смысл только для шкал отношений и интервалов (разностей). В шкалах порядка можно говорить только о числах, приписанных конкретным проявлениям свойства. Говорить о том, что такие числа отличаются в такое-то число раз или на столько-то процентов, нельзя. Для шкал отношений и разностей иногда недостаточно установить только единицу измерений. Так, даже для таких величин, как время, температура, сила света (и другие световые величины), которым в Международной системе единиц (СИ) соответствуют основные единицы — секунда, Кельвин и кандела, практические системы измерений опираются также на специальные шкалы. Кроме того, сами единицы СИ в ряде случаев базируются на фундаментальных физических константах.

В этой связи можно выделить три вида физических величин, измерение которых осуществляется по различным правилам.

К первому виду физических величин относятся величины, на множестве размеров которых определены лишь отношения порядка и эквивалентности. Это отношения типа «мягче», «тверже», «теплее», «холоднее» и т. д.

К величинам такого рода относятся, например, твердость, определяемая как способность тела оказывать сопротивление проникновению в него другого тела, температура, как степень нагретости тела и т. п.

Существование таких отношений устанавливается теоретически или экспериментально с помощью специальных средств сравнения, а также на основе наблюдений за результатами воздействия физической величины на какие-либо объекты.

Для второго вида физических величин отношение порядка и эквивалентности имеет место как между размерами, так и между разностями в парах их размеров. Так, например, разности интервалов времени считаются равными, если расстояния между соответствующими отметками равны.

Третий вид составляют аддитивные физические величины.

Аддитивными физическими величинами называются величины, на множестве размеров которых определены не только отношения порядка и эквивалентности, но операции сложения и вычитания. К таким величинам относятся длина, масса, сила тока и т. п. Их можно измерять по частям, а также воспроизво-

дить с помощью многозначной меры, основанной на суммировании отдельных мер. Например, сумма масс двух тел — это масса такого тела, которое уравнивает на равноплечных весах первые два.

1.2. ПОНЯТИЕ О СИСТЕМЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Множество физических величин представляют собой некоторую систему, в которой отдельные величины связаны между собой системой уравнений.

Система физических величин — это совокупность взаимосвязанных физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие являются функциями независимых величин. Система физических величин содержит основные физические величины, условно принятые в качестве независимых от других величин этой системы, и производные физические величины, определяемые через основные величины этой системы.

Основная физическая величина — это физическая величина, входящая в систему единиц и условно принятая в качестве независимой от других величин этой системы.

Производная единица системы единиц — единица производной физической величины системы единиц, образованная в соответствии с уравнением, связывающим ее с основными единицами.

Производная единица называется когерентной, если в этом уравнении числовой коэффициент принят равным единице. Соответственно, система единиц, состоящая из основных единиц и когерентных производных, называется когерентной системой единиц физических величин.

Для каждой физической величины должна быть установлена единица измерения.

Единица физической величины — физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено значение, равное единице, и применяемая для количественного выражения однородных физических величин.

Кроме основных и производных физических величин различают кратные, дольные, когерентные, системные и внесистемные единицы.

Число независимо установленных величин равно разности числа величин, входящих в систему, и числа независимых уравнений связи между величинами.

Например, если скорость тела определяется по формуле $V = L/t$, то независимо можно установить только две величины, а третью выразить через них.

Размерность физической величины — выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях, и отражающее связь данной величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные и с коэффициентом пропорциональности, равным единице.

Степени символов основных величин, входящих в одночлен, могут быть целыми, дробными, положительными и отрицательными.

Размерность величин обозначают знаком \dim . В системе LMT размерность величины X будет:

$$\dim X = L^l M^m T^t,$$

где L, M, T — символы величин, принятых за основные (соответственно, длина, масса, время); l, m, t — целые или дробные, положительные или отрицательные вещественные числа, которые являются показателями размерности.

Размерность физической величины является более общей характеристикой, чем определяющее величину уравнение, так как одна и та же размерность может быть присуща величинам, имеющим различную качественную сторону.

Например, работа силы F определяется уравнением $A = FL$; кинетическая энергия движущегося тела — уравнением $E_k = mV^2/2$, а размерности первой и второй — одинаковы.

Над размерностями можно производить различные действия: умножение, деление, возведение в степень и извлечение корня.

Показатель размерности физической величины — показатель степени, в которую возведена размерность основной физической величины, входящей в размерность производной физической величины.

Размерности широко используют при образовании производных единиц и для проверки однородности уравнений. Если все показатели степени размерности равны нулю, то такая физическая величина называется безразмерной. Все относительные величины (отношение одноименных величин) являются безразмерными.

Глава 2

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ

Первая система единиц физических величин, хотя она и не являлась еще системой единиц в современном понимании, была принята Национальным собранием Франции в 1791 г. Она включала в себя единицы длины, площади, объема, вместимости и массы, основными из которых были две единицы: метр и килограмм.

Систему единиц как совокупность основных и производных единиц впервые в 1832 г. предложил немецкий ученый К. Гаусс. Он построил систему единиц, где за основу принял единицы длины (миллиметр), массы (миллиграмм) и времени (секунда), и назвал ее абсолютной системой.

С развитием физики и техники появились другие системы единиц физических величин, базирующиеся на метрической основе. Все они были построены по принципу, разработанному Гауссом. Эти системы нашли применение в разных отраслях науки и техники. Разработанные в то время измерительные средства, градуированные в соответствующих единицах, находят применение и в настоящее время.

Многообразие единиц измерения физических величин и систем единиц осложняло их применение. Одни и те же уравнения между величинами имели различные коэффициенты пропорциональности. Свойства материалов, процессов выражались различными числовыми значениями. Международный комитет по мерам и весам выделил из своего состава комиссию по разработке единой Международной системы единиц. Комиссия разработала проект Международной системы единиц, который был утвержден XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. Принятая система была названа Международной системой единиц, сокращенно СИ (*SI* — начальные буквы наименования *System International*).

Учитывая необходимость охвата Международной системой единиц всех областей науки и техники, в ней в качестве основных, были выбраны семь единиц. В механике — это единицы длины, массы и времени, в электричестве добавляется единица силы электрического тока, в теплоте — единица термодинамической температуры, в оптике — единица силы света, в молекулярной физике, термодинамике и химии — единица количества вещества. Эти семь единиц — *метр, килограмм, секунда, ампер,*

Кельвин, кандела и моль — выбраны в качестве основных единиц СИ и приведены в табл. 2.1.

Единица длины — метр — длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ долю секунды.

Единица массы — килограмм — масса, равная массе международного прототипа килограмма.

Единица времени — секунда — продолжительность 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома *цезия-133*.

Единица силы тока — ампер — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади круглого поперечного сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает между проводниками силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Таблица 2.1

Величина		Единица СИ		
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
			русское	международное
Основные				
Длина	<i>L</i>	метр	<i>м</i>	<i>m</i>
Масса	<i>M</i>	килограмм	<i>кг</i>	<i>kg</i>
Время	<i>T</i>	секунда	<i>с</i>	<i>s</i>
Сила тока	<i>I</i>	ампер	<i>А</i>	<i>A</i>
Термодинамическая температура	Θ	Кельвин	<i>К</i>	<i>K</i>
Сила света	<i>J</i>	кандела	<i>кд</i>	<i>cd</i>
Количество вещества	<i>N</i>	моль	<i>моль</i>	<i>mol</i>
Дополнительные				
Плоский угол	—	радиан	<i>рад</i>	<i>rad</i>
Телесный угол	—	стерадиан	<i>ср</i>	<i>sr</i>

Единица термодинамической температуры — Кельвин — $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Допускается использовать также шкалу Цельсия.

Единица силы света – кандела — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

Единица количества вещества — моль — количество веществ системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в углероде-12 массой 0,012 кг.

Основные единицы Международной системы имеют удобные для практических целей размеры и широко применяются в соответствующих областях измерений.

Международная система единиц содержит также две дополнительные единицы: для плоского угла — радиан и для телесного угла —стерадиан (см. табл. 2.1).

Радиан (рад) — единица плоского угла, равная углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу. В градусном исчислении $1 \text{ рад} = 57^{\circ}17'44,8''$.

Стерадиан (ср) — единица, равная телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы. Телесный угол Ω измеряют косвенно — путем измерения плоского угла α при вершине конуса с последующим вычислением по формуле

$$\Omega = 2\pi \left[1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right].$$

Телесному углу в 1 ср соответствует плоский угол, равный $65^{\circ}32'$, углу $\pi \text{ ср}$ — плоский угол 120° , углу $2\pi \text{ ср}$ — плоский угол 180° . Дополнительные единицы используются только для теоретических расчетов и образования производных единиц, например, угловой скорости, углового ускорения. Для измерения углов применяют угловые градусы, минуты и секунды. Приборов для измерения углов в радианах нет.

Угловые единицы не могут быть введены в число основных, так как это вызвало бы затруднение в трактовке размерностей величин, связанных с вращением (дуги окружности, площади круга, работы пары сил и т. д.). Вместе с тем угловые единицы нельзя считать и производными, так как они не зависят от выбора основных единиц. Действительно, при любых единицах длины размеры радиана и стерадиана остаются неизменными.

Из семи основных единиц и двух дополнительных в качестве производных выводят единицы для измерений физических величин во всех областях науки и техники.

В решениях XI и XII Генеральных конференций по мерам и весам даны 33 производных единицы СИ. Примеры производных единиц, имеющих собственные наименования, приведены в табл. 2.2.

Важным принципом, который соблюден в Международной системе единиц, является ее *когерентность* (согласованность). Так, выбор основных единиц системы обеспечил полную согласованность механических и электрических единиц. Например, *ватт* — единица механической мощности (равный джоулю в секунду) равняется мощности, выделяемой электрическим током силой *1 ампер* при напряжении *1 вольт*.

В СИ, подобно другим когерентным системам единиц, коэффициенты пропорциональности в физических уравнениях, определяющих производные единицы, равны безразмерной величине.

Когерентные производные единицы Международной системы образуются с помощью простейших уравнений связи между величинами (определяющих уравнений), в которых величины приняты равными единицам СИ.

Например, единица скорости образуется с помощью уравнения, определяющего скорость прямолинейно и равномерно движущейся точки $V = l/t$, где V — скорость, l — длина пройденного пути, t — время. Подстановка вместо l , t и V их единиц СИ дает $[V] = [l]/[t] = 1 \text{ м/с}$. Следовательно, единицей скорости СИ является метр в секунду. Он равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время $t = 1 \text{ с}$ перемещается на расстояние $l = 1 \text{ м}$.

Например, если для образования единицы энергии используется уравнение $T = mV^2/2$, где T — кинетическая энергия; m — масса тела; V — скорость движения точки, то когерентная единица энергии в СИ образуется следующим образом:

$$1 = \left(\frac{2[m][V]^2}{2} \right) = \frac{2 \text{ кг} \left(1 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right)^2}{2} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж}.$$

Таблица 2.2

Производные единицы СИ, имеющие собственное наименование				
Величина	Единица		Выражение производной единицы	
	Наименование	Обозначение	через другие единицы СИ	через основные единицы СИ
Частота	<i>герц</i>	<i>Гц</i>	—	s^{-1}
Сила	<i>ньютон</i>	<i>Н</i>	—	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Давление	<i>паскаль</i>	<i>Па</i>	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	<i>джоуль</i>	<i>Дж</i>	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Мощность, поток энергии	<i>ватт</i>	<i>Вт</i>	$Дж/с$	$m^1 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Количество электричества, электрический заряд	<i>кулон</i>	<i>Кл</i>	$A \cdot s$	$s \cdot A$
Электрическое напряжение, электрический потенциал	<i>вольт</i>	<i>В</i>	$Вм/А$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \times A^{-1}$
Электрическая емкость	<i>фарада</i>	<i>Ф</i>	$Кл/В$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \times sc^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	<i>ом</i>	<i>Ом</i>	$В/А$	$m^2 \cdot kg \times sc^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	<i>сименс</i>	<i>См</i>	$А/В$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \times sc^3 \cdot A^2$
Поток магнитной индукции	<i>вебер</i>	<i>Вб</i>	$В \cdot с$	$m^2 \cdot kg \times sc^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнитная индукция	<i>тесла</i>	<i>Т</i>	$Вб/м^2$	$kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность	<i>генри</i>	<i>Гн</i>	$Вб/А$	$m^2 \cdot kg \times sc^{-2} \cdot A^{-2}$
Световой поток	<i>люмен</i>	<i>лм</i>	—	$кд \cdot ср$
Освещенность	<i>люкс</i>	<i>лк</i>	—	$m^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активность нуклида	<i>беккерель</i>	<i>Бк</i>	$Вq$	s^{-1}
Доза излучения	<i>грэй</i>	<i>Гр</i>	Gu	$m^2 \cdot c^{-1}$

Единицей энергии в СИ является *джоуль* (равный *ньютонметру*). Он равен кинетической энергии тела массой 2 кг, движущегося со скоростью 1 м/с.

В Международной системе единиц, как и в других системах единиц физических величин, важную роль играет размерность.

Размерностью называют символическое (буквенное) обозначение зависимости производных величин (или единиц) от основных.

Например, если какая-либо физическая величина X выражается через длину L , массу M и время T (являющихся основными величинами в системе единиц типа $L M T$) формулой $X = f(L, M, T)$, то можно показать, что результаты измерений будут независимы от выбора единиц в том случае, если функция f будет однородной функцией длины, массы и времени. Пусть

$X = L^p M^q T^r$. Размерность величины X выражается формулой $\dim X = L^p M^q T^r$, где \dim — сокращение от слова *dimension* — размерность.

Данная формула показывает, как производная величина связана с основными величинами и называется *формулой размерности* и так как всякая величина может быть представлена как произведение ее числового значения $\{X\}$ на единицу $[X]$ $X = \{X\}[X]$, ее можно представить в виде

$$\{X\}[X] = \{L\}^p \{M\}^q \{T\}^r [L]^p [M]^q [T]^r.$$

Равенство величин в этой формуле распадается на два равенства:

– равенство числовых значений

$$\{X\} = \{L\}^p \{M\}^q \{T\}^r;$$

– равенство единиц

$$[X] = [L]^p [M]^q [T]^r.$$

Размерность служит качественной характеристикой величины и выражается произведением степеней основных величин, через которые может быть определена.

Размерность не полностью отражает все качественные особенности величин. Встречаются различные величины, имеющие одинаковую размерность. Например, работа и момент силы, сила тока и магнитодвижущая сила и др.

Размерность играет важную роль при проверке правильности сложных расчетных формул в теории подобия и теории размерностей.

2.1. ПРЕИМУЩЕСТВА МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ

Основными преимуществами Международной системы единиц являются:

- унификация единиц физических величин на базе СИ. Для каждой физической величины устанавливается одна единица и система образования кратных и дольных единиц от нее с помощью множителей. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования приведены в табл. 2.3;
- система СИ является универсальной системой. Она охватывает все области науки, техники и народного хозяйства;
- основные и большинство производных единиц СИ имеют удобное для практического применения размеры. В системе разграничены единицы массы (килограмм) и силы (ньютон);
- упрощается запись уравнений и формул в различных областях науки и техники. В СИ для всех видов энергии (механической, тепловой, электрической и др.) установлена одна, общая единица — джоуль.

Таблица 2.3

Множитель	Приставка	Обозначение приставок		Множитель	Приставка	Обозначение приставок	
		международное	русское			международное	русское
10^{18}	экса	E	Э	10^{-1}	деци	d	д
10^{15}	пета	P	П	10^{-2}	санτι	c	с
10^{12}	тера	T	Т	10^{-3}	милли	m	м
10^9	гига	G	Г	10^{-6}	микро	μ	мк
10^6	мега	M	Ь	10^{-9}	нано	N	н
10^3	кило	k	к	10^{-12}	пико	P	п
10^2	гекто	h	г	10^{-15}	фемто	F	ф
10^1	дека	da	да	10^{-18}	атто	A	а

Глава 3

ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

3.1. ВИДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения физической величины необходимо создать возможности выделения измеряемой величины среди других величин; установления единицы, необходимой для измерения выделенной величины; материализации (воспроизведения и хранения) установленной единицы техническими средствами; сохранения неизменным размера единицы (в пределах установленной точности) как минимум на срок, необходимый для измерений.

Измерения могут быть классифицированы следующим образом.

Признак классификации:	Вид измерений:
по характеристике точности	равноточные, неравноточные
по числу измерений в ряду измерений	однократные, многократные
по отношению к изменению измеряемой величины	статические, динамические
по метрологическому назначению	технические, метрологические
по выражению результата	абсолютные, относительные
по общим приемам получения результатов измерений	прямые, косвенные, совместные, совокупные

Равноточные измерения — это ряд измерений физической величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений и в одних и тех же условиях.

Неравноточные измерения — это ряд измерений, выполненных различными по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Неравноточные измерения обрабатывают с целью получения результата только в том случае, когда невозможно получить ряд равноточных измерений.

Однократное измерение — это измерение, выполненное только один раз.

Многократное измерение — это измерение одного и того же размера физической величины, результат которого получен из

нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоящее из ряда однократных измерений. При четырех измерениях и более, входящих в ряд, измерение можно считать многократным. За результат многократного измерения обычно применяют среднее арифметическое значение из отдельных измерений.

Статическое измерение — это измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения. Например, измерение диаметра детали при нормальной температуре.

Динамическое измерение — это измерение изменяющейся по размеру физической величины и, если необходимо, ее изменения во времени. Например, измерение переменного напряжения электрического тока.

Технические измерения — это измерения с помощью рабочих средств измерений. Применяются с целью контроля и управления. Например, измерения диаметра деталей в ходе технологического процесса.

Метрологические измерения — это измерения при помощи эталонов и образцовых средств измерений с целью воспроизведения единиц физических величин для передачи их размера рабочим средствам измерений.

Абсолютные измерения — это измерения, основанные на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Например, измерение силы F основано на измерении основной величины — массы (m) и использования физической постоянной g (в точке измерения массы).

Относительные измерения — это измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или изменения величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Прямые измерения — это измерения, проводимые прямым методом, при котором искомое значение величины получают непосредственно. Например, измерение длины штангенциркулем или микрометром, угла — угломером и т. п.

Косвенные измерения — это измерения, проводимые косвенным методом, при котором искомое значение физической величины определяется на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с

искомой величиной. Например, определение объема прямоугольного параллелепипеда по значениям его ширины B , длины L и высоты H . Как известно, эти величины связаны между собой уравнением $V = BLH$.

Совокупные измерения — это проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при этом искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях различных сочетаний этих величин.

Например, необходимо определить размеры физических величин A_1 , A_2 и A_3 , но нет возможности измерить непосредственно эти величины, а имеются средства, позволяющие определить суммы любых двух из указанных величин. Тогда, измеряя различные сочетания величин, получим

$$A_1 + A_2 = a; A_1 + A_3 = b; A_2 + A_3 = c,$$

где a , b и c — результаты измерения соответствующих пар размеров величины. Решив эту систему уравнений можно определить величины A_1 , A_2 и A_3 .

Совместные измерения — это проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Например, на основании ряда одновременных измерений приращения длины образца в зависимости от изменений его температуры (полученных в результате измерений) определяют коэффициент линейного расширения образца.

По своей сути, совместные измерения ничем не отличаются от косвенных измерений.

3.2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

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

Здесь под принципом измерений понимается физическое явление или эффект, положенный в основу измерения тем или иным типом средств измерений. Например, применение эффекта Доплера для измерения скорости или силы тяжести при измерении массы взвешиванием.

Метод измерений обычно обусловлен устройством средств измерений.

Различают следующие основные методы измерений: непосредственной оценки, сравнения с мерой, дифференциальный, нулевой, контактный и бесконтактный.

Непосредственный метод — метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора. Например, измерение размера с помощью штангенциркуля или микрометра, силы электрического тока амперметром и т. п.

Метод сравнения с мерой — метод измерений, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Например, измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями (мерами массы с известными значениями).

Нулевой метод измерений — метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры доводят до нуля. Например, измерение сопротивления с помощью моста сопротивлений.

Метод измерения замещением — метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой. Например, на чашку весов, предназначенную для взвешивания массы, устанавливают полный комплект гирь и уравновешивают весы произвольным грузом. Затем на чашку с гирями помещают взвешиваемую массу и снимают часть гирь для восстановления равновесия. Суммарное значение массы снятых гирь соответствует значению взвешиваемой массы (способ Д.И. Менделеева).

Метод измерений дополнением — метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор воздействовала сумма, равная заранее заданному значению.

Дифференциальный метод измерений — метод, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от измеряемой величины, и измеряется разность между этими двумя значениями. В этом случае относительная погрешность Δx измеряемой величины x будет следующей:

$$\Delta x = \frac{a}{x} \Delta_{и} + \Delta_{м},$$

где Δ_m — относительная (отнесенная к номинальному значению меры x_m) погрешность калибровки меры; Δ_i — инструментальная погрешность прибора ($a = x - x_m$).

При малых a влияние Δ_i на точность результата измерений может быть сведено к нулю. Этот метод нашел широкое распространение в поверке.

Контактный метод измерений — метод, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения. Например, контроль температуры термометром.

Бесконтактный метод измерения — метод, основанный на том, что чувствительный элемент прибора не приводится в контакт с объектом измерения. Например, измерение температуры пирометром.

Выбор того или иного метода измерений определяется назначением их результатов и требованиями к точности.

3.3. ПОНЯТИЕ О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Точность результата измерения — характеристика качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности результата. Эти погрешности являются следствием многих причин: несовершенство средств и метода измерений, отсутствие опыта оператора, недостаточная тщательность проведения измерения, воздействие внешних условий и т. д. Для уменьшения погрешностей необходимо устранить или уменьшить влияние каждой из причин их появления. Точность измерений обычно характеризуется погрешностью измерения. Считается, что чем меньше погрешность измерения, тем больше его точность.

Каждый результат содержит погрешность, которую можно представить в следующем виде:

$$\Delta x_{\text{изм}} = x_{\text{изм}} - x_d,$$

где $\Delta x_{\text{изм}}$ — погрешность измерения; $x_{\text{изм}}$ — результат измерения; x_d — действительное (истинное) значения измеряемой величины.

Так как истинное значение физической величины x_d неизвестно, то для определения погрешности измерения вместо него принимают действительное значение физической величины x_r ,

определяемое с точностью, достаточной для оценки погрешности измерения. Тогда погрешность измерения можно оценить разностью между результатом измерения X и x_r :

$$\Delta x_{\text{изм}} = X - x_r.$$

Для оценки степени приближения результатов измерения к истинному значению измеряемой величины используются методы теории вероятностей и математической статистики. Использование методов, разработанных в рамках теории вероятностей и математической статистики, позволяет с определенной достоверностью оценить границы погрешностей, за пределы которых они не выходят. Это дает возможность для каждого конкретного случая выбрать средства и методы измерения, обеспечивающие получение результатов, погрешности которых не превышают заданных границ с требуемой степенью доверия к результатам измерений (достоверностью).

3.4. ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Специализация и кооперирование производства в масштабе страны, основанные на принципах взаимозаменяемости, требуют обеспечения и сохранения единства измерений.

В 1993 г. был принят «Закон Российской Федерации об обеспечении единства измерений», который устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений в Российской Федерации. Закон регулирует отношения государственных органов управления Российской Федерации с юридическими и физическими лицами по вопросам изготовления, выпуска, эксплуатации, ремонта, продажи и импорта средств измерений и направлен на защиту прав и законных интересов граждан, установленного правопорядка и экономики Российской Федерации от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.

Закон «Об обеспечения единства измерений» состоит из семи разделов: общие положения; единицы величин, средства и методики выполнения измерений; метрологические службы; государственный метрологический контроль и надзор; калибровка и сертификация средств измерений; ответственность за нарушение закона и финансирование работ по обеспечению единства измерений.

В первом разделе устанавливаются и законодательно закрепляются основные понятия, принимаемые для целей Закона: единство измерений, средство измерений, государственный эталон единицы величины, нормативные документы по обеспечению единства измерений, метрологическая служба, метрологический контроль и надзор, поверка и калибровка средств измерений, сертификат об утверждении типа средств измерений, аккредитация на право поверки средств измерений и сертификат о калибровке (определения этих понятий приводятся в соответствующих главах учебника).

В первой статье Закона дается следующее определение понятия «единство измерений».

Единство измерений — состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

Понятие «единство измерений» охватывает важнейшие задачи метрологии: унификацию единиц; разработку систем воспроизведения единиц и передачи их размеров рабочим средствам измерений с установленной точностью; проведение измерений с погрешностью, не превышающей установленные пределы и др. Единство измерений должно выдерживаться при любой точности измерений, необходимой народному хозяйству.

Обеспечение единства измерений является задачей метрологических служб (метрологическая служба — совокупность субъектов деятельности и видов работ, направленных на обеспечение единства измерений).

Закон определяет, что *Государственная метрологическая служба* находится в ведении Госстандарта России и включает: государственные научные метрологические центры; органы Государственной метрологической службы на территории республик в составе Российской Федерации, автономной области, автономных округов, краев, областей, городов Москвы и Санкт-Петербурга.

Госстандарт России осуществляет руководство Государственной службой времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), Государственной службой стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО) и Государственной службой стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД) и координацию их деятельности.

Государственные научные метрологические центры несут ответственность за создание, совершенствование, хранение и применение государственных эталонов единиц величин, а также за разработку нормативных документов по обеспечению единства измерений.

Органы Государственной метрологической службы осуществляют государственный метрологический контроль и надзор на территориях республик в составе Российской Федерации, автономной области, автономных округов, краев, областей, городов Москвы и Санкт-Петербурга.

Государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения Земли осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по обеспечению единства измерений времени, частоты и определения параметров вращения Земли.

Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по разработке и внедрению стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов в отраслях народного хозяйства в целях обеспечения единства измерений на основе их применения.

Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по разработке и внедрению стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов в науке и технике в целях обеспечения единства измерений на основе их применения.

3.5. ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Средство измерений или комплекс средств измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утвержденные в качестве эталона в установленном порядке, является *эталон* единицы физической величины.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения определяются природой физической величины (единица которой воспроизводится) и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений.

Эталон должен обладать следующими существенными признаками: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

Неизменность эталона — свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного периода времени, а все изменения, зависящие от внешних условий (температура, влажность, давление и т. п.), должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению.

Воспроизводимость эталона — возможность воспроизведения единицы физической величины с наименьшей погрешностью для данного уровня развития измерительной техники.

Сличаемость эталона — возможность обеспечения сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме, с наивысшей точностью для данного уровня развития техники измерений.

Различают следующие виды эталонов: первичный, специальный, государственный, вторичный, эталон-свидетель, эталон-копия, эталон-сравнения, рабочий эталон, международный эталон и др.

Под *первичным эталоном* понимается эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же величины) точностью.

Первичные эталоны — уникальные средства измерений, часто представляющие собой сложнейшие измерительные комплексы. Они составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений. Многие первичные эталоны утверждаются в качестве государственных эталонов.

В качестве *специального эталона* используется эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы в особых условиях и служащий для этих условий первичным эталоном.

Государственный эталон единицы величины — эталон единицы величины, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории Российской Федерации.

Для того чтобы обеспечить воспроизведение единиц с максимально возможной точностью, государственные эталоны постоянно совершенствуются. Для обеспечения единства измерений физических величин в международном масштабе важную роль играют международные сличения национальных государственных эталонов. Эти сличения помогают выявить система-

тические погрешности воспроизведения единицы национальными эталонами, выявить, насколько национальные эталоны соответствуют международному уровню и наметить пути совершенствования национальных (государственных) эталонов.

Например, по решению Генеральной конференции по мерам и весам, из 42 экземпляров прототипов килограмма России были переданы № 12 и № 26, причем № 12 утвержден в качестве государственного эталона массы. Прототип № 26 использовался как вторичный эталон.

Национальный (государственный) эталон массы хранится в НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в Санкт-Петербурге на кварцевой подставке под двумя стеклянными колпаками в стальном сейфе, температура воздуха поддерживается в пределах 20 ± 3 °С, относительная влажность 65 %. Один раз в 10 лет с ним сличаются два вторичных эталона. При сличении с международным эталоном наш национальный эталон массы получил значение 1,0000000877 кг. Для передачи размера единицы массы (1 кг) от прототипа № 12 вторичным эталонам используются специальные весы № 1 и № 2 с дистанционным управлением. Весы № 1 изготовлены фирмой «Рупрехт», а № 2 — НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Погрешность воспроизведения килограмма составляет $2 \cdot 10^{-9}$.

Отклонения массы эталонов, определяемые при международных сличениях, показывают достаточную степень ее стабильности. В табл. 3.1 приведены результаты международных сличений эталона массы.

Таблица 3.1

Страна	Номер эталона	Отклонение массы эталона, мг		Разность массы эталонов
		первое сличение	второе сличение	
Международный эталон	31	0,162	0,128	-0,034
Франция	35	0,191	0,183	-0,008
СССР	12	0,068	0,085	0,017
США	20	-0,039	-0,019	0,020
Япония	6	0,169	0,170	0,001
Италия	5	0,018	0,018	0,000
Швейцария	38	0,183	0,214	0,031

Совокупность первичных эталонов составляет эталонную базу страны, и является основой обеспечения единства измерений. Число эталонов не является постоянным, а изменяется в зависимости от потребностей народного хозяйства страны. Обычно прослеживается увеличение их числа во времени, что обусловлено постоянным развитием рабочих средств измерений.

В качестве *вторичного эталона* используется эталон, получающий размер единицы путем сличений с первичным эталоном рассматриваемой единицы.

Вторичный эталон является подчиненным по отношению к первичному эталону.

Эталон-свидетель — вторичный эталон, предназначенный для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и для замены его в случае порчи или утраты. В настоящее время только эталон килограмма имеет эталон-свидетель.

Основное назначение эталона-свидетеля — усилить уверенность в постоянстве основного эталона. По существу, с помощью эталона-свидетеля можно лишь констатировать постоянство или изменение соотношения между единицами, воспроизводимыми эталоном-свидетелем и первичным эталоном. Можно также с определенной степенью достоверности утверждать, что в случае постоянства этих отношений размеры единиц, воспроизводимых эталонами, остаются неизменными.

Эталон-копия — это вторичный эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим эталонам. Такие эталоны создаются в случае большого числа поверочных работ с целью предохранения первичного или специального эталона от преждевременного износа. Эталон-копия представляет собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению и может не всегда являться физической копией государственного эталона. При необходимости эталон-копия может заменить государственный эталон.

Эталон сравнения — это вторичный эталон, который применяется для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом.

Рабочий эталон — это вторичный эталон, применяемый для передачи размера единицы образцовым средствам измерений высшей точности, и в отдельных случаях — наиболее точным рабочим средствам измерений. Рабочие эталоны являются наиболее распространенными вторичными эталонами.

Международный эталон — это эталон, принятый по международному соглашению в качестве первичного международного эталона и служащий для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами.

Глава 4

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Всякий процесс измерения независимо от условий, в которых его проводят, сопряжен с погрешностями, которые искажают представление о действительном значении измеряемой величины.

Источниками появления погрешностей при измерениях могут служить различные факторы, основными из которых являются несовершенство конструкции средств измерений или принципиальной схемы метода измерения, неточность изготовления средств измерений, непостоянство внешних условий при измерениях, субъективные погрешности и т. п.

Под несовершенством средств измерений понимается, например, несоблюдение принципа *Аббе* при линейных измерениях, согласно которому в процессе измерения объект измерения должен быть расположен последовательно с мерой сравнения, т. е. так, чтобы мера и линия измерения являлись продолжением друг друга.

К группе погрешностей, вызванных несовершенством конструкции средств измерения, можно отнести погрешности измерения, вызванные измерительным усилием при контактных измерениях.

Погрешностью средства измерения называется отклонение его показания (выходного сигнала) от воздействующей на его вход измеряемой величины (входного сигнала).

Погрешности, возникающие в процессе измерений можно разделить на систематические и случайные. Кроме этого, в процессе измерения могут появиться грубые (очень большие) погрешности, а также могут быть допущены промахи.

К систематическим погрешностям относят составляющую погрешности измерений, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той

же величины. Как правило, систематические погрешности могут быть в большинстве случаев изучены до начала измерений, а результат измерения может быть уточнен за счет внесения поправок, если их числовые значения определены, или за счет использования таких способов измерений, которые дают возможность исключить влияние систематических погрешностей без их определения.

К случайным погрешностям измерения относят составляющие погрешности измерений, которые изменяются случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

В отличие от систематических случайные погрешности нельзя устранить заранее. Однако уточнить результат измерения можно за счет проведения повторных измерений, т. е. найти значение измеряемой величины, более близкое к истинному, чем результат одного измерения. Эти погрешности являются следствием, например, случайных изменений внешних условий, изменений показаний измерительного прибора, погрешности округления при снятии отсчета и т. п.

Промахами и грубыми погрешностями называют погрешности измерения, которые значительно превышают ожидаемые при данных условиях измерений систематические или случайные погрешности. Если результаты измерений используются в расчетах, то перед этим необходимо исключить измерения, содержащие грубые погрешности. Основными причинами этих погрешностей являются: ошибки экспериментатора; резкое и неожиданное изменение условий измерения; неисправность прибора и т. п. Для выявления грубых погрешностей используются методы математической статистики.

4.2. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

4.2.1. Общие сведения о систематических погрешностях

Систематические погрешности при повторных измерениях остаются постоянными или изменяются по определенному закону. Эти погрешности в некоторых случаях можно определить экспериментально, а следовательно, полученный результат измерения может быть уточнен путем введения поправки.

Известен ряд способов исключения систематических погрешностей, их условно можно разделить на четыре основные группы:

- устранение источников погрешностей до начала измерений;

- исключение погрешностей в процессе измерения способами замещения, компенсации погрешностей по знаку, противопоставления, симметричных наблюдений;
- внесение известных поправок в результат измерения (исключение погрешностей в процессе вычислений);
- оценка границ систематических погрешностей, если их нельзя исключить.

Все эти способы исключения погрешностей измерения будут рассмотрены ниже.

По характеру проявления систематические погрешности подразделяются на постоянные, прогрессивные и периодические.

Постоянные систематические погрешности — погрешности, которые в течение всего времени измерений сохраняют свое значение. Например, если для измерения некоторой величины используется шкала прибора, в градуировке которой имеется погрешность, то такая погрешность входит во все результаты измерения. Это относится к погрешности концевых мер длины, гирь и т. п.

Прогрессивные погрешности — погрешности, которые в процессе измерений возрастают или убывают. К таким погрешностям можно отнести, например, погрешности, возникающие вследствие износа контактирующих деталей средств измерения, постепенное падение напряжения источника тока, питающего измерительную цепь и т. п.

Периодические погрешности — погрешности, значения которых являются периодической функцией времени или функцией перемещения указателя измерительного прибора. Такие погрешности встречаются в индикаторах часового типа (приборах с круговой шкалой и стрелкой). Например, если ось стрелки индикатора смещена относительно центра шкалы на некоторую величину, то погрешность $\Delta\varphi$ изменяется по синусоидальному закону $\Delta\varphi = e \sin\varphi$, где e — эксцентриситет (смещение центра шкалы); φ — угол поворота стрелки в процессе измерения, отсчитываемый от прямой, проходящей через центр шкалы и ось поворота стрелки.

Систематические погрешности могут изменяться также по сложному закону за счет совместного действия нескольких систематических погрешностей. Например, такой погрешностью является погрешность меры длины, которая возникает при отклонении от нормальной температуры, при которой выполня-

ются измерения. Величина этой погрешности определяется по формуле

$$\Delta l_t = (\alpha \Delta t + \beta \Delta t^2) l_n,$$

где Δl_t — погрешность меры длины, возникающая при изменении температуры на Δt , °С; l_n — длина меры при нормальной температуре; $\Delta t = t_n - t_n$ — отклонение температуры от нормальной; t_n — нормальная температура; t_n — температура при измерении; α и β — постоянные коэффициенты, определяемые опытным путем.

В группу систематических погрешностей можно отнести: инструментальные погрешности; погрешности из-за неправильной установки измерительного устройства; погрешности, возникающие вследствие внешних влияний; погрешности метода измерения (теоретические погрешности); субъективные погрешности.

Инструментальными погрешностями называют погрешности, причина которых заключается в свойствах применяемых средств измерений. Например, равноплечие весы не могут быть идеально равноплечими. Причиной инструментальных погрешностей является также трение в сочленениях подвижных деталей приборов.

Средствам измерений, имеющим шкалу, присущи погрешности, возникающие из-за неточности нанесения отметок шкалы (*погрешности градуировки*). Инструментальные погрешности могут появляться вследствие износа (размер концевой меры длины уменьшается). Величина износа зависит от интенсивности использования инструмента.

Правильность показаний ряда средств измерений может зависеть также от положения их подвижных частей относительно неподвижных. К таким средствам относятся, например, равноплечие весы; средства, в конструкцию которых входит маятник или другие подвешенные подвижные части (гальванометры). Отклонение такого средства от правильного положения может привести к погрешности результата. Для уменьшения погрешности измерения в таких средствах используются устройства для установки их в правильное положение (уровни, отвесы и т. п.). Окружающая температура, магнитные и электрические поля,

атмосферное давление, влажность воздуха относятся к внешним условиям, приводящим к возникновению погрешностей вследствие их изменения. Если значения отдельных факторов выходят за пределы установленных границ, то это может оказаться причиной появления дополнительных погрешностей.

Если между измеряемым явлением или свойством и принципом действия средства измерений нет теоретически доказанной зависимости, то это может стать причиной возникновения *погрешностей метода измерения* (теоретических погрешностей).

Погрешности метода измерения являются следствием упрощений или допущений, применения эмпирических формул и зависимостей. Примером таких измерений является измерение твердости металлов различными методами (Роквелла, Бринелля, Викерса и др.). В каждом из этих методов твердость измеряется в своих условных единицах, а перевод результатов из одной шкалы в другую производится приближенно.

Индивидуальные свойства человека, которые обусловлены особенностями его организма или укоренившимися неправильными навыками приводят к *субъективным систематическим погрешностям*. Например, скорость реакции на сигнал различна у разных лиц (на звуковой сигнал скорость реакции человека колеблется в пределах 0,082—0,195 с, а на световой сигнал — 0,15—0,225 с).

4.2.2. Исключение систематических погрешностей

Рассмотрим способы устранения систематических погрешностей.

Устранение источников погрешностей до начала измерения. Этот способ следует считать наиболее рациональным, так как он освобождает от необходимости устранять погрешности в процессе измерения или вычислять результат с учетом поправок. Так, например, для устранения температурной погрешности необходимо обеспечить требуемую температуру окружающей среды с допустимыми колебаниями. Колебание температуры в заданных пределах может быть обеспечено на уровне цеха (термоконстантные цеха), лаборатории, средств измерений в целом или их отдельных частей. При измерении с помощью электронных измерительных устройств их рекомендуется прогревать.

Для устранения влияния на точность измерений внешних магнитных и электрических полей используются различные экраны.

Влияние вредных вибраций на точность измерений может быть устранено за счет использования различного рода амортизаторов.

Влияние влажности и давления на точность измерений может быть исключено, если для измерений использовать, например, специальные камеры.

Для исключения систематических погрешностей в процессе измерения существуют различные способы и приемы без использования специальных установок.

Способ введения поправок основан на знании систематической погрешности и закономерности ее изменения. В этом случае в результат измерения, содержащий систематические погрешности вносят поправки, равные этим погрешностям, но с обратным знаком.

Так, например, к линейным шкалам универсального микроскопа прилагается аттестат, в котором указаны значения и знак поправки для каждого деления шкалы. Однако необходимо отметить, что как сами источники, так и условия возникновения систематических погрешностей в той или иной мере изменяются. Поэтому постоянство значений всякой систематической погрешности при повторных измерениях будет соблюдаться в определенных пределах, за которыми будут иметь место отклонения, носящие случайный характер. Если, например, систематическую погрешность исключить введением поправки, то случайные отклонения значений погрешности от значений поправки останутся не исключенными.

Способ замещения — заключается в том, что измеряемый объект заменяют известной мерой, находящейся при этом в тех же условиях, в каких находился он сам. Например, на чашку весов, предназначенную для взвешивания массы, устанавливают полный комплект гирь и уравнивают весы произвольным грузом. Затем на чашку с гирями помещают взвешиваемую массу и снимают часть гирь для восстановления равновесия. Суммарное значение массы снятых гирь соответствует значению взвешиваемой массы (*способ Д. И. Менделеева*). Такой способ не только устраняет погрешность, но и сохраняет чувствительность при взвешивании различных масс.

Способ замещения используется при измерении электрических параметров — сопротивления, емкости, индуктивности. Объект измерения ставят в ту или иную измерительную цепь. Уравнивают цепь (мост). Не изменяя схемы, заменяют измеряемый

объект, включая в цепь меру переменного значения. Снова уравновешивают цепь. Определяют значение измеряемой величины.

Способ компенсации погрешности по знаку заключается в том, что измерение производят дважды так, чтобы неизвестная по размеру погрешность входила в результаты с противоположными знаками. Например, с целью исключения погрешности измерения угла конуса на инструментальном микроскопе, связанной со смещения оси центров, в которых устанавливается конус, производят измерение угла сначала по одной образующей (совмещая горизонтальную линию штриховой измерительной головки с образующей конуса), а затем с другой стороны. Пусть α_1 и α_2 — результаты двух измерений; Δ — систематическая погрешность (смещение оси центров), значение которой неизвестно; α_d — значение угла конуса, свободное от данной погрешности. Тогда, например, $\alpha_1 = \alpha_d + \Delta$, а $\alpha_2 = \alpha_d - \Delta$. Среднее

$$\text{значение угла } \alpha_p = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{(\alpha_d + \Delta) + (\alpha_d - \Delta)}{2} = \alpha_d.$$

Способ противопоставления имеет большое сходство со способом компенсации по знаку. Он заключается в том, что измерения проводят два раза, причем так, чтобы причина, вызывающая погрешность, при первом измерении оказывала противоположное действие на результат второго. Например, при взвешивании на равноплечих весах для исключения погрешности от остаточной неравноплечести при первом взвешивании массу x помещают на одну чашку весов и уравновешивают гири с общей массой m_1 , помещенными на другую чашку.

Тогда $x = (l_1/l_2)m_1$, где l_1/l_2 — действительное отношение плеч.

Затем взвешиваемую массу перемещают на ту чашку, где находились гири, а гири — на ту, где находилась масса, но так как отношение плеч l_1/l_2 не точно равно единице, равновесие достигается при использовании гирь общей массой m_2 : $m_2 = (l_1/l_2)x$.

Разделив первое равенство на второе, получим $x = \sqrt{m_1 m_2}$ или, если m_1 и m_2 отличаются друг от друга незначительно $x = (m_1 + m_2)/2$.

Способ применяется в тех случаях, когда сравнивается измеряемая величина с мерой примерно равного значения.

СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

Случайные погрешности представляют собой погрешности, в появлении каждой из которых не наблюдается какой-либо закономерности. Случайные погрешности неизбежны и неустранимы и всегда присутствуют в результате измерения. Они вызывают рассеяние результатов при многократном и достаточно точном измерении одной и той же величины при неизменных условиях, приводя к различию их в последних значащих цифрах. Другими словами, результаты многократных измерений одной и той же постоянной величины в одних и тех же условиях с помощью одного и того же измерительного устройства одним и тем же оператором могут отличаться друг от друга.

Каждая случайная погрешность возникает в результате воздействия многих факторов, каждый из которых сам по себе не оказывает значительного влияния на результат.

Случайные погрешности не поддаются исключению из результатов измерений, поэтому при рассмотрении их влияния на результат измерений задача сводится к изучению свойств совокупностей результатов отдельных наблюдений.

Природа и физическая сущность случайных и систематических составляющих погрешности измерений различна. Однако оценка неисключенных остатков систематических и случайных погрешностей осуществляется на основе обработки статистического материала, представляющего собой совокупность результатов измерений.

Для изучения случайных погрешностей используются методы теории вероятностей и математической статистики. Эти методы применимы и для неисключенных систематических составляющих.

5.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Дискретные и непрерывные случайные величины. По своей физической природе измеряемые величины могут быть детерминированными и случайными.

Дискретной (прерывной) называют случайную величину, отдельные значения которой можно перенумеровать.

Примерами дискретных случайных величин являются: число изделий, отказавших в процессе испытаний; количество бракованных деталей в партии и т. д.

Непрерывной называют случайную величину, возможные значения которой непрерывно заполняют некоторый промежуток. Примеры непрерывных случайных величин: отклонение размера изготовленной детали от номинала, погрешность измерения, величина отклонения формы детали, высота микронеровностей в данной точке поверхности и т. д.

Случайная величина не может характеризоваться каким-то одним значением. Для нее необходимо указать множество возможных значений и вероятностные характеристики, заданные на этом множестве.

Дискретные случайные величины полностью характеризуются вероятностями своих отдельных значений

$$p_k = P(X = x_k); \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (5.1)$$

Равенства $X = x_k$ являются случайным событием, и так как эти равенства образуют полную группу событий, то имеет место следующая формула:

$$\sum_{k=1}^n p_k = 1. \quad (5.2)$$

Вероятностным описанием случайной величины является закон ее распределения.

Законом распределения случайной величины называют соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями. Закон распределения может быть задан в различной форме. Простейшей формой задания закона распределения является таблица, в которой перечислены в порядке возрастания все возможные значения дискретной случайной величины и соответствующие им вероятности, например:

x_1	x_2	x_n
p_1	p_2	p_n

Такую таблицу называют рядом распределения. Графическое изображение ряда распределения называют полигоном распределения случайной величины (рис.5.1).

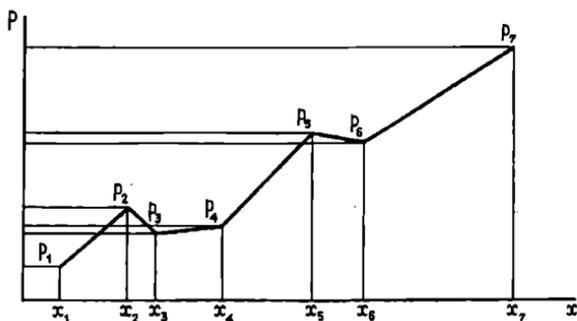


Рис. 5.1. График распределения вероятностей дискретной случайной величины

и в виде дифференциального закона распределения (плотность вероятности).

Функцией распределения случайной величины X называют вероятность выполнения неравенства $X < x$, т. е.

$$F(x) = P(X < x), \quad (5.3)$$

где x — неслучайный аргумент.

Функция распределения $F(x)$ должна быть неубывающей функцией своего аргумента, т. е. $F(-\infty) = 0$ и $F(+\infty) = 1$.

На рис. 5.2 приведены графики функции распределения $F(x)$ для дискретной (5.2, а) и непрерывной (5.2, б) случайных величин.

Плотностью вероятности непрерывной случайной величины называют производную функцию распределения

$$\varphi(x) = F'(x) = \lim[F(x + \Delta x) - F(x)] / \Delta x. \quad (5.4)$$

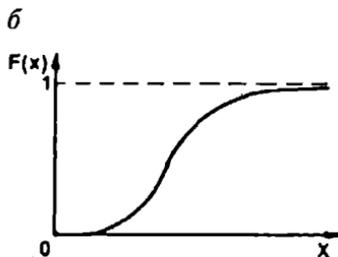
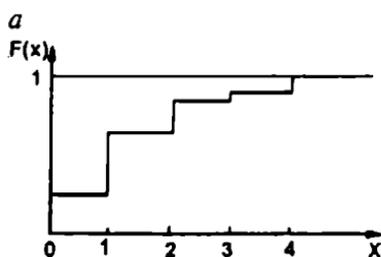


Рис. 5.2. Функции распределения дискретной (а) и непрерывной (б) случайных величин

Задание функции распределения является общей формой закона распределения, как для дискретных, так и для непрерывных случайных величин. Функцию распределения можно задать в виде интегрального закона распределения (функция распределения)

Плотность вероятности $\varphi(x)$ обладает следующими свойствами:

$\varphi(x) \geq 0$ — неотрицательна;

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x) dx = 1. \quad (5.5)$$

График плотности вероятности $\varphi(x)$ представлен на рис. 5.3.

Функция распределения $F(x)$ выражается через плотность вероятности $\varphi(x)$ формулой

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(x) dx. \quad (5.6)$$

Функция распределения $F(x)$, как и вероятность, есть величина безразмерная, а плотность вероятности имеет размерность, обратную размерности случайной величины.

Вероятность попадания непрерывной случайной величины на заданный интервал (a, b) определяется выражением

$$P(a < X < b) = F(b) - F(a) = \int_a^b \varphi(x) dx. \quad (5.7)$$

Геометрически эта вероятность равна площади криволинейной трапеции, ограниченной кривой распределения, осью абсцисс и прямыми $x = a$ и $x = b$ (см. рис. 5.3).

5.2. ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Для изучения распределения случайных величин пользуются рядом числовых характеристик: *мер положения* и *мер рассеивания*.

К характеристикам положения относятся: математическое ожидание, мода, медиана. Математическое ожидание случайной величины называют также средним значением случайной величины.

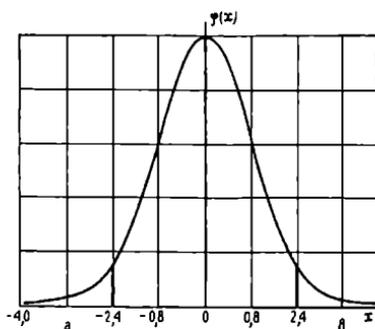


Рис. 5.3. График плотности вероятности