

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Забайкальский государственный университет»

**Е. С. КРАПИВИНА
И. В. САДОВНИКОВ**

МЕТРОЛОГИЯ

Часть 1

Учебное пособие

Чита
Забайкальский государственный университет
2017

УДК 006.91(075)

ББК 30.10я7

К 77

Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом
Забайкальского государственного университета

Рецензенты:

В. А. Ильиных, канд. техн. наук, доцент, Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита;

А. Г. Калинин, канд. техн. наук, доцент, Забайкальский институт предпринимательства – филиал Сибирского университета потребительской кооперации, г. Чита

Крапивина, Елена Сергеевна

К 77

Метрология : учеб. пособие / Е. С. Крапивина, И. В. Садовников ; Забайкал. гос. ун-т. – Чита : ЗабГУ, 2017.

ISBN 978-5-9293-2023-1

Ч. 1. – 2017. – 176 с.

ISBN 978-5-9293-2024-8

В учебном пособии рассматриваются теоретические основы метрологии. В издании представлены понятия в области метрологии, теории измерений, теории воспроизведения единиц физических величин и передачи их размеров, погрешности измерений, методы обработки результатов измерений, построения и использования средств измерений.

Издание адресовано студентам, обучающимся по направлению подготовки 27.03.01 *Стандартизация и метрология*; разработано с учётом требований ФГОС и основывается на применении компетентного подхода в реализации образовательного процесса.

УДК 006.91(075)

ББК 30.10я7

ISBN 978-5-9293-2024-8 (Ч. 1)

ISBN 978-5-9293-2023-1

© Забайкальский государственный университет, 2017

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Предмет и задачи метрологии	7
1.1. Основные понятия и предмет метрологии	7
1.2. Значение метрологии в процессе познания и научно-техническом прогрессе	8
1.3. Краткая справка об истории развития метрологии	10
1.4. Структура метрологии	18
1.5. Структура теоретической метрологии	19
1.6. Физические свойства и величины	20
1.7. Классификация физических величин	22
1.8. Качественная и количественная характеристика величин	27
1.9. Шкалы измерения	30
Глава 2. Основы теории единства измерений	37
2.1. Основные понятия теории единства измерений	37
2.2. Основы построения систем единиц физических величин	38
2.3. Международная система единиц величин	39
2.4. Воспроизведение и передача размера единиц	51
2.5. Эталоны единиц физических величин	53
Глава 3. Основы теории измерений	57
3.1. Основные понятия теории измерений	57
3.2. Постулаты теории измерений	57
3.3. Основные характеристики измерений	61
3.4. Классификация измерений	65
3.5. Основные операции измерения	69
3.6. Структурные элементы измерения	73
3.7. Условия проведения измерений	78
3.8. Основные этапы измерения	81
Глава 4. Основы теории погрешностей измерения	86
4.1. Основные понятия теории погрешностей	86
4.2. Классификация погрешностей измерения	87
4.3. Систематические погрешности и способы их обнаружения и устранения	94
4.4. Описание случайных погрешностей	102

4.5. Грубые погрешности и методы их исключения	113
4.6. Концепция неопределённости измерения	117
4.7. Обработка результатов прямых многократных измерений	126
Глава 5. Теория построения средств измерений	147
5.1. Основные понятия теории построения средств измерений	147
5.2. Меры и эталоны	149
5.3. Измерительные преобразователи	153
5.4. Средства измерений	154
5.5. Метрологические характеристики средств измерений	158
5.6. Класс точности средства измерений	161
Заключение	169
Библиографический список	170
Приложения	173

Введение

Учебное пособие по курсу «Метрология» предназначено для подготовки бакалавров по направлению 27.03.01 *Стандартизация и метрология*. В соответствии ФГОС, «Метрология» – профессиональная базовая дисциплина, изучение которой является неотъемлемой составной частью подготовки квалифицированных специалистов по стандартизации и метрологии.

Эта комплексная дисциплина формирует у будущих специалистов метрологические навыки, нормативность поведения, оценочную культуру.

Метрология занимает промежуточное положение между науками фундаментального цикла и техническими науками. Метрология – это «наука для наук». Необходимость её изучения обусловлена ролью измерений, которые являются важнейшей составной частью современных наукоёмких технологий во многих областях деятельности.

Каждую секунду в мире производятся миллиарды измерительных операций, результаты которых используются для обеспечения надлежащего качества и технического уровня выпускаемой продукции, обеспечения безопасной и безаварийной работы транспорта, для медицинских и экологических диагнозов и других важных целей. Практически нет ни одной сферы деятельности человека, где бы интенсивно не использовались результаты измерений, испытаний и контроля. Для их получения задействованы миллионы человек и большие финансовые средства.

Диапазон измеряемых величин и их количество постоянно растут. Так, например, длина измеряется от 10^{-10} до 10^{17} м, температура – от 0,5 до 10 К, электрическое сопротивление – от 10^{-6} до 10^{17} Ом, сила электрического тока – от 10^{-16} до 10^4 А, мощность – от 10^{-15} до 10^9 Вт. С ростом диапазона измеряемых величин возрастает и сложность измерений. Они превращаются в сложную процедуру подготовки и проведения измерительного эксперимента, обработки и интерпретации полученной информации. Поэтому необходимо рассматривать

измерительные технологии, понимаемые как последовательность действий, направленных на получение измерительной информации требуемого качества.

Основа любой формы управления, анализа, прогнозирования, планирования, контроля или регулирования – достоверная исходная информация, которая может быть получена лишь путём измерения требуемых величин, параметров и показателей. Соответственно, только высокая и гарантированная точность результатов измерений обеспечивает правильность принимаемых решений. Современная наука и техника позволяют выполнять многочисленные и точные измерения, но затраты на них становятся соизмеримыми с затратами на исполнительные операции.

Изучение метрологии позволяет получить теоретические знания и практические навыки, освоить технологии разработки методик измерений, проводить измерения, оценивать и истолковывать их результаты.

Метрологии посвящено много публикаций, основную массу которых составляют научно-технические труды, освещающие отдельные вопросы теории измерений. Среди лучших работ следует отметить труды Г. Д. Бурдуна и Б. Н. Маркова, В. А. Грановского, М. А. Земельмана, В. П. Короткова и Б. А. Тайца, П. В. Новицкого и И. А. Зографа, И. Ф. Шишкина.

Учебное пособие состоит из пяти разделов. Первый раздел посвящён основным терминам и определениям метрологии. Во втором – рассмотрены основные вопросы теории единиц величин, эталонов и теории передачи размеров единиц величин. В третьем разделе освещены вопросы общей теории измерений. В четвёртом – представлены основные понятия теории погрешностей, приведена подробная классификация погрешностей. В пятом – обобщается опыт построения средств и методов измерений.

В издании использованы новые метрологические термины и определения, введённые с января 2015 г. В доступной форме изложены теоретические положения метрологии, в конце каждого раздела для самопроверки приведены контрольные вопросы.

Глава 1. Предмет и задачи метрологии

1.1. Основные понятия и предмет метрологии

Понятие «метрология» произошло от сочетания двух греческих слов: «метрон» (μετρον – мера) и «логос» (λόγος – учение).

Современная метрология – это область знаний и вид деятельности, связанный с измерениями.

Общепринятое определение термина «метрология» дано в РМГ 29-2013: метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности [24].

Базисное положение этой науки определил основоположник отечественной метрологии Д. И. Менделеев в словах: «Наука начинается... с тех пор, как начинают измерять; точная наука немислима без меры». Ему же принадлежит и другое важное замечание: «В природе мера и вес суть главные орудия познания».

Предметом метрологии является измерение свойств объектов (длины, массы, плотности и т. д.) и процессов (скорость протекания, интенсивность протекания и др.) с заданной точностью и достоверностью.

Основное понятие метрологии – измерение.

Измерения количественно характеризуют окружающий мир, раскрывая объективные законы природы. В настоящее время термин «измерение» трактуется как процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине.

Объектом измерения является величина.

Величина – это свойство материального объекта или явления общее в качественном отношении для многих объектов или явлений.

Средства метрологии – это совокупность средств измерений и метрологических стандартов, обеспечивающих их рациональное использование.

Основной задачей метрологии как науки и области практической деятельности является обеспечение единства измерений.

Единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы [24].

1.2. Значение метрологии в процессе познания и научно-техническом прогрессе

Измерения – один из важнейших путей познания. Значимость измерений выражается в трёх аспектах: философском, научном и техническом.

Философский аспект состоит в том, что измерения являются важнейшим универсальным средством познания физических явлений и процессов. Процесс познания в обобщённом виде представляет собой исследование, заканчивающееся получением качественной или количественной информации. Количественную информацию получают посредством измерений [27].

Научный аспект измерений заключается в том, что с их помощью в науке осуществляется связь теории и практики. На получении точной измерительной информации, питающей абстрактное мышление, основаны успехи всех естественных наук. Математика, механика, физика стали именоваться точными науками потому, что, благодаря измерениям, они получили возможность устанавливать точные и количественные соотношения, выражающие объективные законы природы. Без измерений невозможна проверка научных гипотез и, соответственно, развитие науки.

Технический аспект измерений состоит в том, что измерения обеспечивают получение количественной информации об объекте управления или контроля, без которой невозможно точное воспроизведение всех заданных условий технического процесса, обеспечение высокого качества изделий и эффективного управления объектом.

Метрология, как наука об измерениях, находится в тесной связи со всеми другими науками, так как без измерений не может обойтись ни одна наука. Большое значение метрология имеет для развития естественных и технических наук, так как повышение точности измерений – это одно из средств совершенствования путей познания природы человеком, открытий и практического применения точных знаний.

Современная научно-техническая революция обусловила развитие метрологии, связанное с усовершенствованием эталонов, разработкой новых методов точных измерений, осуществлением мероприятий по обеспечению единства и требуемой точности измерений.

Для обеспечения научно-технического прогресса метрология должна опережать в своем развитии другие области науки и техники, так как для каждой из них точные измерения являются одним из основных путей их совершенствования.

Велико значение метрологии для современного общества. В практической жизни человек всюду имеет дело с измерениями. Каждую секунду в мире производятся многие миллиарды измерительных операций, результаты которых используются для обеспечения надлежащего качества и технического уровня выпускаемой продукции, обеспечения безопасной и безаварийной работы транспорта, для медицинских и экологических диагнозов и других важных целей. Практически нет ни одной сферы деятельности человека, где бы интенсивно не использовались результаты измерений, испытаний и контроля. Для их получения задействованы миллионы человек и большие финансовые средства. Только в РФ ежедневно проводится около 200 млрд измерений, свыше 4 млн человек считают измерения

своей профессией. Доля затрат на измерения составляет 10–15 % затрат общественного труда, а в отраслях промышленности, производящих сложную технику она достигает 50–70 %.

Степень проникновения метрологии в различные сферы деятельности человека и качество количественных оценок вполне может служить мерой уровня цивилизации общества.

1.3. Краткая справка об истории развития метрологии

Измерения являются одним из самых древних занятий в познавательной деятельности человека. Их возникновение относится к истокам материальной культуры человечества.

Когда наш предок – древний, но уже мыслящий человек – попытался найти для себя пещеру, он вынужден был соразмерить длину, ширину и высоту своего будущего убежища с собственным ростом. А ведь это и есть измерение – сравнение неизвестной величины с однородной ей величиной, принятой за единицу. Наш предок располагал только собственным ростом, реальной длиной рук и ног. Первые измерения были антропометрическими измерениями.

Изречение древнегреческого философа Протагора гласит: «Человек – мера всех вещей» (« $\mu\alpha\upsilon\tau\omega\nu$ $\chi\rho\eta\mu\alpha\tau\omega\nu$ $\mu\epsilon\tau\rho\omega\nu$ $\epsilon\sigma\tau\iota$ o $\alpha\upsilon\tau\acute{\omicron}\rho\omega\varsigma$) [34]. И этому подтверждение – сохранившиеся названия мер.

Так, в Киевской Руси единицами длины служили: вершок (верх перста) – длина фаланги указательного пальца (см. рис. 1а); пядь (от «пятерни») – расстояние между концами вытянутых большого и указательного пальцев (см. рис. 1б); локоть – расстояние от локтя до конца среднего пальца (см. рис. 1в); сажень (от «сягать», достигать) – предел того, что может достать человек. При этом различали маховую сажень – расстояние между концами средних пальцев вытянутых в противоположные стороны рук; косую сажень – расстояние от пятки одной ноги до конца пальцев разжатой ладони другой поднятой вверх руки (см. рис. 1г).

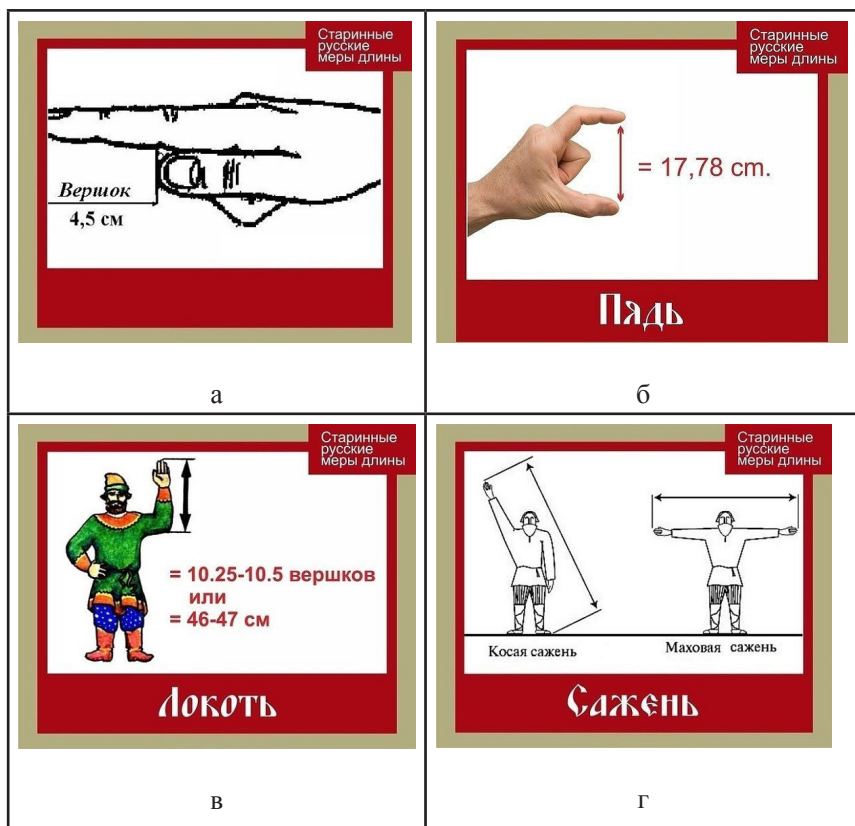


Рис. 1. Единицы длины, используемые в древней Руси:
а – вершок; б – пядь; в – локоть; г – сажень

В Древнем Риме расстояния оценивали *переходами* – длиной пути, проходимого человеком за день; в земледелии применялся *акт* – длина борозды, которую пара быков пропахивала без понуканий. Исходными мерами у римлян служили стопа (фут), локоть [34].

В английской системе мер и сейчас присутствует фут от англ. *foot* – ступня (см. рис. 2).

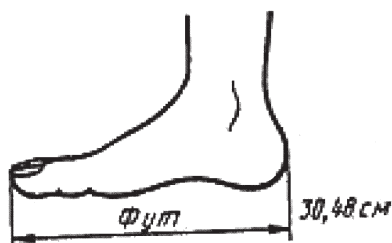


Рис. 2. Изображение английской единицы длины «фут»

Длина фута уточнена англичанами с введением такой единицы длины, как шток – это «длина ступней 16 человек, выходящих из храма от заутрени в воскресенье». Деля длину штока на 16 равных частей, получали среднюю длину ступни, ибо из церкви выходили разные люди различного роста (см. рис. 3). Длина фута «устоялась» в размере 30,48 см.

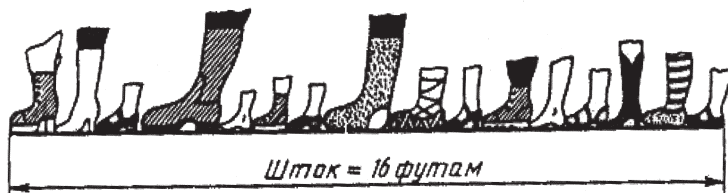


Рис. 3. Изображение английской единицы длины «шток»

Английский ярд тоже связан с размерами человеческого тела, но уже конкретного лица – короля Англии Генриха I (1101). Это расстояние от кончика носа этого монарха до конца среднего пальца вытянутой им вперед руки. Романтическая версия: ярд – длина меча этого же короля; 1 ярд = 0,9144 м.

Многие авторы утверждают, что за дюйм (голланд. *duim* – большой палец; была принята длина второго сустава большого пальца руки человека. Но более вероятно, что это ширина большого пальца (приложите свой палец к линейке и Вы убедитесь, что размеру дюйма 25,4 мм (см. рис. 4) соответствует именно этот параметр пальца).

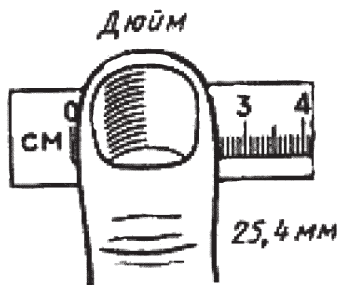


Рис. 4. Изображение английской единицы длины «дюйм»

Длина дюйма была уточнена в Англии, где в 1324 г. королём Эдвардом II был установлен «законный дюйм», равный длине трёх ячменных зёрен, вынутых из средней части колоса и приставленных друг к другу своими концами. Приверженность англичан к ячменным зернам видна и в попытке определить с их помощью и фут. Они условились считать геометрическим футом ширину 64 ячменных зёрен (ширина зёрен более стабильна).

Во многих странах и сейчас не отказались от мили (различая при этом милю морскую и милю сухопутную), а ведь по-латински *milīa* – это тысяча; и в случае сухопутной мили – это тысяча двойных человеческих шагов. Локоть, или по-персидски арш, т. е. аршин, – расстояние от локтевого сустава до конца среднего пальца вытянутой руки.

Исследователи подчёркивают, что затруднительно установить точное значение меры, изменявшееся в разных странах в разное время. Например, английский локоть в XIV в. равнялся 1,37 м в Шропшире; 1,22 м в Джерси; 0,95 м в Шотландии; в Австрии локоть в XIX в. приближался к 80 см; во Франкфурте существовал локоть всего 54,7 см. Аршин в Московском государстве в XIV в. равнялся 70,9 см, позже – 72 см и, наконец, 71,1 см. Сажень в XIII в. составляла 152 см, затем – 180 см, в XV в. – 216 см, а в XIX в. – 213,36 см [17].

Вместе с тем уже в древности стали использоваться вещественные меры. Так, в Древнем Вавилоне во II в. до н. э. при-

менялась мера времени мина, составлявшая промежуток, за который вытекала вода из принятых там водяных часов (примерно два астрономических часа). Впоследствии мина стала меньше и превратилась в нашу минуту.

В качестве мер веса использовались естественные предметы: до нашего времени дошли карат (в переводе «семя боба, горошина», приблизительно 0,2 г), единица аптекарского веса гран (от лат. зерно – *granum*; англ. *grain*; франц. *grain*; итал. *grano*; исп. *grana* [34]).

У славян, например, была мера длины вержение камня – бросок камнем, перестрел – расстояние, которое пролетала стрела, выпущенная из лука. Расстояния измерялись и так: «Печенегия отстояла от хазар на пять дней пути, от алан на шесть дней, от Руси на один день, от мадьяр на четыре дня и от болгар дунайских на полдня пути» («Слово о полку Игореве»). В старинных русских грамотах о пожаловании земли можно прочесть: «От погоста во все стороны на бычачий рев», т. е. на расстояния, с которых ещё можно услышать рев быка. У других народов отмечают аналогичные меры – коровий крик, петушинный крик. Мерой могло быть время «пока закипит котел воды». Эстонские моряки могут и сейчас сказать, что до берега ещё «три трубки» (время на выкуривание набитых табаком трубок). Пушечный выстрел – тоже мера расстояния. В Японии одно время не знали подков для лошадей и обували их соломенными подошвами, отсюда появилась мера расстояния – соломенный башмак – расстояние, на котором этот башмак изнашивался.

Некоторые старые русские единицы измерения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Старые русские единицы измерения

<i>Единицы длины</i>	
Верста	= 500 сажням = 1,0668 км
Сажень	= 3 аршинам = 2,1336 м
Аршин	= 16 вершкам = 71,120 см
Фут	= 30,48 см

Вершок	= 4,445 см
Дюйм	= 25,4 мм
Линия	= 2,54 мм
Точка	= 0,254 мм
<i>Единицы объёма, вместимости</i>	
Кубический аршин	= 0,35972 м ³
Кубический фут	= 28,317 дм ³
Кубический вершок	= 87,824 см ³
Кубический дюйм	= 16,387 см ³
Кубическая линия	= 16,387 см ³
<i>Единица объёма, вместимости для жидкостей</i>	
Бочка	= 40 ведрам = 491,91 л = 0,5 м ³
Ведро	= 12,299 л
Четверть (ведра)	= 3,0749 л
Штоф	= 0,1 ведра = 1,230 л
Шкалик	= 61,497 мл
<i>Единицы объёма, вместимости для сыпучих тел</i>	
Четверть	= 8 четвертинкам = 64 гранцам = 209,91 дм ³
Лот	= 3 золотникам = 12,797 г
Доля	= 44,435 м
<i>Единицы массы</i>	
Бенрковец	= 10 пудам = 163,8 кг
Пуд	= 40 фунтам = 16,3805 кг
Фунт	= 32 лотам = 96 золотникам = 409,51 г

На определённом этапе своего развития измерения стали причиной возникновения метрологии. Долгое время последняя существовала как описательная наука, констатирующая сложившиеся в обществе соглашения о мерах используемых величин. Развитие науки и техники привело к использованию множества мер одних и тех же величин, применяемых в различных странах. Так, расстояние в России измерялось верстами, а в Англии – милями. Все это существенно затрудняло сотрудничество между государствами в торговле, науке.

С целью унифицировать единицы физических величин (ФВ), сделать их независимыми от времени и разного рода случайностей во Франции была разработана метрическая система мер. Эта система строилась на основе естественной единицы – метра, равного одной сорокамиллионной части меридиана, проходящего через Париж. За единицу массы принимался килограмм – масса кубического дециметра чистой воды при температуре +4 °С. Учредительное собрание Франции 26 марта 1791 г. утвердило предложения Парижской академии наук. Это явилось серьёзной предпосылкой для проведения международной унификации единиц ФВ.

В 1832 г. К. Гаусс предложил методiku построения систем единиц ФВ как совокупности основных и производных величин. Он построил систему единиц, названную абсолютной, в которой за основу были приняты три произвольные, независимые друг от друга единицы: длины – миллиметр, массы – миллиграмм и времени – секунда.

В 1835 г. в России был издан указ «О системе Российских мер и весов», в котором были утверждены эталоны длины (платиновая сажень) и массы (платиновый фунт). В 1842 г. на территории Петропавловской крепости в Санкт-Петербурге в специально построенном здании открылось первое метрологическое учреждение России – Депо образцовых мер и весов. В нём хранились эталоны и их копии, изготавливались образцовые меры для передачи в другие города, проводились сличения российских мер с иностранными. Деятельность Депо регламентировалась «Положением о мерах и весах», которое положило начало государственному подходу к обеспечению единства измерений в стране. В 1848 г. в России вышла первая книга по метрологии – «Общая метрология» (автор – Ф. И. Петрушевский). В этой работе описаны меры и денежные знаки различных стран.

В 1875 г. семнадцать государств, в том числе и Россия, на дипломатической конференции подписали Метрическую конвенцию, к которой в настоящее время примкнула 41 страна мира. Согласно этой конвенции устанавливается международ-

ное сотрудничество подписавших её стран. Для этого было создано Международное бюро мер и весов (МБМВ), находящееся в г. Севре близ Парижа. В нем хранятся международные прототипы ряда мер и эталоны единиц некоторых ФВ. В соответствии с конвенцией для руководства деятельностью МБМВ был учрежден Международный комитет мер и весов (МКМВ), в который вошли учёные из различных стран. Сейчас при МКМВ действуют семь консультативных комитетов: по единицам, определению метра, секунды, термометрии, электричеству, фотометрии и по эталонам для измерения ионизирующих излучений.

Очень много для развития отечественной метрологии сделал Д. И. Менделеев. Период с 1892 по 1917 гг. называют менделеевским этапом развития метрологии. В 1893 г. на базе Депо образцовых мер и весов была утверждена Главная палата мер и весов, управляющим которой до последних дней жизни был Д. И. Менделеев. Она стала одним из первых в мире научно-исследовательских учреждений метрологического профиля.

До 1918 г. метрическая система внедрялась в России факультативно, наряду со старой русской и английской (дюймовой) системами. Значительные изменения в метрологической деятельности стали происходить после подписания Советом народных комиссаров РСФСР декрета «О введении международной метрической системы мер и весов». Внедрение метрической системы в России происходило с 1918 по 1927 г. После Великой Отечественной войны и до сего времени метрологическая работа в нашей стране проводится под руководством Государственного комитета по стандартам (Госстандарт).

В 1960 г. XI Международная конференция по мерам и весам приняла Международную систему единиц физических величин – систему СИ. Сегодня метрическая система узаконена более чем в 124 странах мира.

В настоящее время на базе Главной палаты мер и весов существует высшее научное учреждение страны – Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им.

Д. И. Менделеева (ВНИИМ). В лабораториях института разрабатываются и хранятся государственные эталоны единиц измерений, определяются физические константы и свойства веществ и материалов. Тематика работ института охватывает линейные, угловые, оптические и фотометрические, акустические, электрические и магнитные измерения, измерения массы, плотности, силы, давления, вязкости, твёрдости, скорости, ускорения и ряда других величин.

В 1955 г. под Москвой был создан второй метрологический центр страны – ныне Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Он разрабатывает эталоны и средства точных измерений в ряде важнейших областей науки и техники: радиоэлектронике, службе времени и частоты, акустике, атомной физике, физике низких температур и высоких давлений.

Третьим метрологическим центром России является Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС) – головная организация в области прикладной и законодательной метрологии. На него возложена координация и научно-методическое руководство метрологической службой страны. Кроме перечисленных существует ряд региональных метрологических институтов и центров.

К международным метрологическим организациям относится и Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), образованная в 1956 г. При МОЗМ в Париже работает Международное бюро законодательной метрологии. Его деятельностью руководит Международный комитет законодательной метрологии. Некоторые вопросы метрологии решает Международная организация по стандартизации (ИСО).

1.4. Структура метрологии

В зависимости от предмета различают три раздела метрологии: теоретическая (фундаментальная), законодательная и практическая (прикладная) метрология [24].

Теоретическая (фундаментальная) метрология – раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии.

Законодательная метрология – раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и требуемой точности измерений.

Практическая (прикладная) метрология – раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

1.5. Структура теоретической метрологии

Теоретическая метрология является основным разделом метрологии и рассматривает общие вопросы теории измерений. Её структура представлена на рис. 6.

В разделе «Основные представления метрологии» рассмотрены и обобщены:

- 1) понятия, сложившиеся в отдельных областях измерений с учётом специфики метрологии;
- 2) постулаты метрологии, на основе которых строится теория, и выводятся важные практические следствия;
- 3) вопросы построения единой системы физических величин;
- 4) вопросы метрологической методологии и научной организации измерительных процессов.

Главной задачей является создание единой системы основных понятий метрологии, которая должна служить базой для её развития.

Раздел «Теория единства измерений» является центральным в теоретической метрологии. В нём рассматриваются основные вопросы теории единиц величин, теории исходных средств измерений или эталонов и теории передачи размеров единиц величин.

В разделе «Теория построения средств измерений» обобщается опыт конкретных наук в области построения средств и методов измерений. Важной задачей является разработка новых и совершенствование известных измерительных преобразователей.

В разделе теоретической метрологии «Теория точности измерений» обобщены методы, развиваемые в конкретных областях измерений. Он состоит из трёх подразделов: теории погрешностей, теории точности средств измерений и теории измерительных процедур.

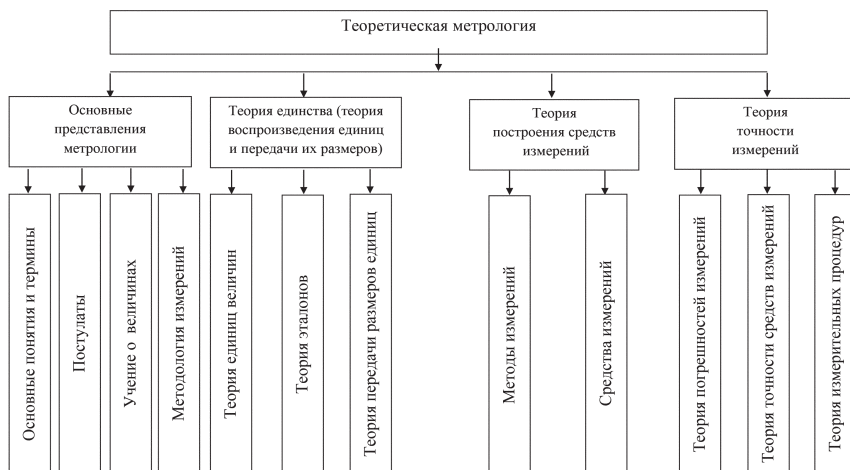


Рис. 5. Структура теоретической метрологии

1.6. Физические свойства и величины

Все объекты окружающего мира характеризуются своими свойствами. Свойство – это философская категория, выражающая такую сторону объекта, которая обуславливает его различие или общность с другими объектами и обнаруживается в его отношениях к ним. Свойство является качественной ка-

тегорией. Для количественного описания различных свойств объектов вводится понятие величины. Величина – свойство объекта, явления или процесса, которое может быть различным качественно и определено количественно.

Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной.

Анализ величин позволяет разделить их на два вида: реальные и идеальные (см. рис. 6).

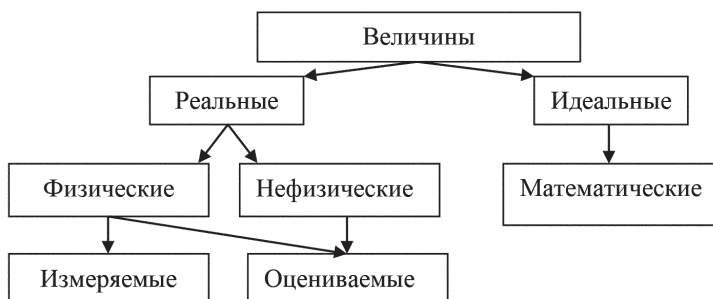


Рис. 6. Классификация величин

Идеальные величины относятся к математике и являются моделью конкретных реальных понятий (например, $\pi = 3,14$). Они вычисляются тем или иным способом.

Реальные величины делятся на физические и нефизические. Нефизические величины используются в педагогике, философии, социологии, психологии и гуманитарных и общественных науках, а также видах деятельности.

Физическая величина в общем случае может быть определена как величина, свойственная материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных (физика, химия) и технических науках.

Физические величины разделяются на измеряемые и оцениваемые. Измеряемые физические величины могут быть выражены количественно, в виде определённого числа установленных единиц измерения. Физические величины, для

которых по тем или иным причинам не может быть введена единица измерения, могут быть только оценены, то есть по установленным правилам величине может быть приписано определённое число. Нефизические величины, для которых единица измерения в принципе не может быть введена, могут быть только оценены.

1.7. Классификация физических величин

Для выявления общих метрологических особенностей отдельных групп физических величин необходимо их классифицировать (см. табл. 2).

История развития метрологии показывает, что все физические величины проходят одинаковый путь [32]. После открытия и идентификации нового свойства и определения физической величины сначала разрабатывается способ её количественного оценивания, затем, по мере накопления знаний, оценивание заменяют косвенными измерениями. Далее создают меры и методы прямых измерений этой ФВ, на основе которых создается система метрологического обеспечения этого нового измерения.

Таблица 2

Классификация физических величин

<i>№ п/п</i>	<i>Классификационный признак</i>	<i>Вид физической величины</i>	<i>Определение принадлежности ФВ к виду</i>	<i>Пример ФВ, относящейся к виду</i>
1	По видам явлений	Энергетические (активные)	Величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии	Ток, напряжение, мощность, энергия
		Вещественные (пассивные)	Величины, определяющие физические и физико-химические свойства веществ и их состав	Масса, плотность, электрическое сопротивление и т. д.
		Информационные (характеризующие протекание процессов во времени)	Величины, которые определяют свойства, отражающие динамические или статические характеристики процессов	Амплитуда сигнала, частота, фаза, спектральные характеристики и т. д.

№ п/п	Классификационный признак	Вид физической величины	Определение принадлежности ФВ к виду	Пример ФВ, относящейся к виду
2	По принадлежности к различным группам физических процессов	Пространственно- временные		
		Механические		
		Тепловые		
		Электрические и магнитные		
		Акустические		
		Световые		
		Физико-химические		
		Ионизирующих излучений Атомной и ядерной физики		
3	По степени условной независимости от других величин	Основные	Величины условно независимые от величин данной группы	Длина, масса, время, температура, сила тока, количество вещества, сила света
Производные	Величины условно зависимые от величин данной группы	Мощность, напряжение, сила и т. д.		

4	По наличию размерности	Размерные		величины, имеющие размерность	масса, давление, объём и т. д.
		Безразмерные	Относительные	Безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную	КПД, относительная плотность, относительные магнитная и диэлектрическая проницаемость, и т. д.
			Логарифмические	Логарифмы отношений одноименных физических величин	Уровень звукового давления, усиления, ослабления электрических мощностей и энергий
		Проявляющиеся только в отношении эквивалентности и аддитивности	Могут быть обнаружены, классифицированы, поименованы, подвергнуты контролю по классам характерных свойств и отражены числами	Виды животных, атлас цветов и т. д.	

№ п/п	Классификационный признак	Вид физической величины	Определение принадлежности ФВ к виду	Пример ФЗ, относящейся к виду
		Проявляющиеся в отношении эквивалентности и порядка	Определяются интенсивными величинами, путём сравнения которых можно определить их соотношение и упорядочить по интенсивности данного свойства: больше, меньше или равно	Твёрдость материала, запах, оттенков одного цвета, сила ветра, время, температура
		Проявляющиеся в отношении эквивалентности, порядка и аддитивности	Определяются экстенсивными величинами, которые могут быть обнаружены, классифицированы, подвергнуты контролю и измерены	Длина верёвки, масса тела, электрическое сопротивление проводника и др.

1.8. Качественная и количественная характеристика величин

Все физические величины имеют качественные и количественные характеристики. Отражением качественного различия измеряемых величин является их размерность. Размерность обозначается символом *dim*, происходящим от слова *dimension*, которое в зависимости от контекста может переводиться и как размерность, и как размер.

Размерность величины – выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных величин в различных степенях и отражающее связь данной величины с величинами, принятыми в данной системе величин за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1.

Размерность основных величин – длины, массы, времени, термодинамической температуры, силы электрического тока, количества вещества и силы света – обозначается соответствующими прописными буквами.

Например: $\dim l = L$; $\dim m = M$; $\dim t = T$.

Производные величины могут быть образованы как с помощью основных, так и других (уже образованных) производных величин (1)

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma \Theta^\varepsilon I^\delta N^\zeta J^\eta, \quad (1)$$

где L, M, T, Θ, I, N, J – размерности соответствующих основных величин;

$\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \delta, \zeta, \eta$ – показатели размерности.

Показатель размерности – показатель степени, в которую возведена размерность основной величины, входящая в размерность производной величины.

Каждый из показателей размерности может быть положительным, отрицательным, целым или дробным числом, нулём.

Величина, в размерность которой основные величины входят в степени, равной нулю называется безразмерной.

Показатель размерности основной величины в отношении самой себя равен единице. При определении размерности производных величин руководствуются следующими правилами [33]:

1. Размерности левой и правой частей уравнений должны совпадать, т. к. сравнивать между собой можно только одинаковые свойства.

2. Алгебра размерностей мультипликативна, т. е. состоит из одного математического действия – умножения.

Размерность произведения нескольких величин равна произведению их размерностей. Если зависимость между величинами имеет вид (2)

$$Q = A \cdot B \cdot C, \text{ то } \dim Q = \dim A \cdot \dim B \cdot \dim C. \quad (2)$$

Размерность частного при делении величины на другую равна отношению их размерностей, т. е., если (3)

$$Q = \frac{A}{B}, \text{ то } \dim Q = \frac{\dim A}{\dim B}. \quad (3)$$

Размерность любой величины, возведенной в некоторую степень, равна произведению её размерности в той же степени, т. е., если (4)

$$Q = A^n, \text{ то } \prod_1^n \dim Q = \dim^n A. \quad (4)$$

Размерность зависит от выбора основных величин, то есть от системы единиц. На практике понятие размерности используют для перевода единиц из одной системы в другую, для проверки правильности сложных расчётных формул, полученных в результате теоретического вывода, для выяснения зависимости между величинами и в теории физического подобия.

Итак, размерность является качественной характеристикой измеряемой величины. Она отражает её связь с основными величинами и зависит от выбора последних. Как указывал

М. Планк, вопрос об «истинной» размерности любой величины «имеет не более смысла, чем вопрос об истинном названии какого-то предмета». По этой причине в гуманитарных науках, искусстве, спорте, квалиметрии, где номенклатура основных величин не определена, теория размерностей не находит пока эффективного применения. В физике, напротив, методами теории размерностей нередко удаётся получать важные самостоятельные результаты. Формальное применение алгебры размерностей иногда позволяет определить неизвестную зависимость между физическими величинами [18].

Для установления различия в количественном содержании свойства изучаемого объекта, отображаемого данной физической величиной, в метрологии введено понятие размера величины.

Размер величины – количественная определённость величины, присущая конкретному материальному объекту или явлению.

Размер величины является объективной реальностью, независящей от того, измеряют или не измеряют соответствующую характеристику свойства объекта. Он существует, но не всегда может быть выражен через числовое значение (шкалы). Размер величины не зависит от того, какая единица принята при измерении величины. Например, 1 г; 1000 мг; 0,001 кг – три варианта представления одного и того же размера в разных единицах измерения. Каждый из них является значением величины.

Значение величины – выражение размера величины в виде некоторого числа принятых единиц, или чисел, баллов по соответствующей шкале измерений.

Если имеется некоторая величина Q и принятая для неё единица измерения равна $[Q]$, то значение физической величины Q равно можно представить в виде произведения

$$Q = q[Q],$$

которое в метрологии называется основным уравнением измерений.

В этом уравнении отражена процедура сравнения неизвестного размера Q с известным $[Q]$ и в тоже время из него видно, что числовое значение величины зависит от размера принятой единицы измерения.

Единица измерения – величина фиксированного размера, которой присвоено числовое значение, равное 1, определяемая и принимаемая по соглашению для количественного выражения однородных с ней величин.

Существует два вида уравнений, связывающих между собой различные величины:

- уравнения связи между величинами;
- уравнения связи между числовыми значениями.

Уравнения связи между величинами представляют соотношения между ними в общем виде, независимо от единиц $X = f(x_1, x_2, x_3, \dots)$. Это уравнение утверждает связь между величинами, обусловленную законами природы. В нём под буквенными символами понимаются физические величины.

Уравнения связи между числовыми значениями используются для установления связи между единицами измерений. Они могут иметь различный вид в зависимости от выбранных единиц, входящих в уравнение величин.

1.9. Шкалы измерения

В практической деятельности постоянно возникает необходимость измерять различные величины, характеризующие свойства тел, веществ, явлений, процессов и систем. Однако некоторые свойства проявляются только качественно, другие – качественно и количественно. Разнообразные проявления какого-либо свойства образуют множества, отображение элементов которых на упорядоченное множество чисел или, в более общем случае, условных знаков – образуют шкалы измерения этих свойств.

Шкала измерений (шкала величины) – упорядоченная совокупность значений величины, служащая исходной основой для измерений данной величины.

В метрологии шкала измерений является средством адекватного сопоставления и определения численных значений отдельных свойств и качеств различных объектов.

В соответствии с логической структурой проявления свойств различают пять основных типов шкал измерений.

1. *Шкала наименований* (шкала классификации, номинальная шкала) – дискретная шкала, основанная на приписывании качественным свойствам объектов чисел, играющих роль имён.

Такие шкалы используются для классификации эмпирических объектов, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности. Эти свойства нельзя считать физическими величинами, поэтому шкалы такого вида не являются шкалами физических величин.

Нумерация объектов по шкале наименований осуществляется по принципу: «Не приписывай одну и ту же цифру разным объектам». Числа, приписанные объектам, могут быть использованы для определения вероятности или частоты появления данного объекта, но их нельзя использовать для суммирования и других математических операций.

Номинальная шкала, используемая для классификации, называется шкалой классификации. При классификации существенно лишь то, что единственное отношение в системе объектов, передаваемое шкалой классификации, – это отношение эквивалентности. Так, все годные изделия эквивалентны в том смысле, что могут быть использованы.

Поскольку данные шкалы характеризуются только отношениями эквивалентности, то в них отсутствуют понятия точки отсчёта, т. е. нуля, «больше» или «меньше» и единицы измерения. Примером шкал наименований являются широко распространённые атласы цветов, предназначенные для идентификации цвета.

2. *Шкала порядка* (шкала рангов) – упорядоченная последовательность опорных (реперных) точек, обозначаемых буквами, цифрами или символами и соответствующих размерам, $Q_1 < Q_2 < Q_3 < \dots < Q_n$, о каждом из которых известно, что он больше предыдущего, но меньше последующего, хотя сами размеры неизвестны.

Если свойство данного эмпирического объекта проявляет себя в отношении эквивалентности и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства, то для него может быть построена шкала порядка. Она является монотонно возрастающей или убывающей и позволяет установить отношение больше/меньше между величинами, характеризующими указанное свойство. В шкалах порядка существует или не существует нуль, но принципиально нельзя ввести единицы измерения, т. к. для них не установлено отношение пропорциональности и соответственно нет возможности судить во сколько раз больше или меньше конкретные проявления свойства.

На практике используют условные шкалы порядка, в которых исходные значения физических величин выражены в условных единицах – ранжированы.

В условных шкалах одинаковым интервалам между размерами данной величины не соответствуют одинаковые размерности чисел, отображающих размеры. С помощью этих чисел можно найти вероятности, моды, медианы, квантили, однако их нельзя использовать для суммирования, умножения и других математических операций.

Широкое распространение получили шкалы порядка с нанесенными на них реперными точками для физических тел и явлений. Точкам реперной шкалы могут быть поставлены в соответствие цифры, называемые баллами. К таким шкалам относятся 10 балльная шкала Мооса для оценивания чисел твёрдости минералов, шкалы Роквелла, Бринелля, Виккерса для определения твёрдости металлов, 12 балльная шкала Бофорта для оценивания силы морского ветра, 12 балльная шкала землетрясений Рихтера (сейсмическая международная шкала), шкала вязкости Энглера, шкала чувствительности фотоплёнок, шкала белизны, акустическая шкала громкости звука и др.

Определение значения величин с помощью шкал порядка нельзя считать измерением, т. к. на этих шкалах не могут быть введены единицы измерения. Операцию по приписыванию числа требуемой величине следует считать оцениванием. Оценивание по шкалам порядка является неоднозначным и весьма условным.

3. *Шкала интервалов* (шкала разностей) – шкала описывающая свойства величин, проявляющиеся в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности.

Шкала интервалов состоит из одинаковых интервалов, масштаб которых устанавливается по согласованию, имеет единицу измерения и произвольно выбранную нулевую точку. На шкале интервалов возможны действия сложения и вычитания интервалов; можно оценить во сколько раз один интервал больше другого. Для некоторых же физических величин сами физические величины складывать бессмысленно, например, для календарных дат.

Шкала интервалов величины Q описывается уравнением $Q = Q_0 + q[Q]$, где q – числовое значение величины; Q_0 – начало отсчёта шкалы; $[Q]$ – единица данной величины.

Примеры шкал интервалов – летоисчисление по различным календарям, шкала времени, температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта, шкала длин

В шкале Цельсия есть две реперные точки: температуры таяния льда и кипения воды. Масштаб по шкале – 1 градус Цельсия – выбирается как одна сотая интервала между двумя реперными точками. В шкале Фаренгейта также две реперные точки: температура смеси льда, поваренной соли и нашатыря и температура человеческого тела. Масштаб по шкале – 1 градус Фаренгейта – выбирается как одна девяностошестая интервала между двумя реперными точками. Перевод значения температуры из одной шкалы в другую осуществляется по следующим формулам:

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(h^{\circ}\text{F} - 32);$$

$$h^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}(t^{\circ}\text{C} + 32).$$

4. *Шкала отношений* – шкала, описывающая свойства эмпирических объектов, которые удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности, а в ряде случаев и пропорциональности.

В данных шкалах существует однозначный естественный критерий нулевого количественного проявления свойства и единица измерений, установленная по соглашению. С формальной точки зрения эта шкала является шкалой интервалов с естественным началом отсчёта. К значениям, полученным по шкале отношений, применимы все арифметические действия, что имеет большое значение при измерении физических величин. Шкалы отношений являются самыми совершенными. Они описываются уравнением $Q = q[Q]$, где Q – физическая величина, для которой строится шкала, $[Q]$ – её единица измерения, q – числовое значение физической величины.

Например, $P = 10 \text{ Н}$, $m = 50 \text{ кг}$.

На шкалах отношений определены любые математические операции.

Переход от одной шкалы отношений к другой происходит в соответствии с уравнением $q_2 = \frac{q_1[Q]_1}{[Q]_2}$, т. к. размер свойства есть величина постоянная.

5. *Абсолютная шкала* – шкала, устанавливающая однозначное (единственно возможное) соответствие между объектами и числами.

Данные шкалы обладают всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеют естественное однозначное определение единицы измерения и не зависят от принятой системы единиц измерения.

Абсолютная шкала может использоваться для измерения относительных величин, которые могут выражаться в безразмерных единицах (когда отношение двух одноименных величин равно 1); в процентах, % (когда отношение равно 10^{-2}); промилле, ‰ (отношение равно 10^{-3}) или в миллионных долях, ppm (отношение равно 10^{-6}).

Ряду абсолютных шкал присущи границы, заключённые между нулем и единицей, причём конечные точки этого диапазона физически как бы бесконечно удалены. Например, коэффициент полезного действия, вероятность. Данное обстоятельство на практике вынуждает переходить к логарифмическим оценкам вблизи этих точек. Логарифмическая величина представляет собой логарифм безразмерного отношения двух одноименных физических величин. Логарифмические величины применяют для выражения уровня звукового давления, усиления, ослабления, выражения частотного интервала и т. д. Единицей логарифмической величины является бел (Б), определяемый соотношением $1\text{Б} = \lg \frac{P_2}{P_1}$, при $P_2 = 10P_1$, где P_1 и P_2 – одноименные энергетические величины мощности, энергии, плотности энергии и т. д. В случае, если берётся логарифмическая величина для отношения двух «силовых» величин (напряжения, силы тока, давления, напряжённости поля и т. п.), бел определяется по формуле $1\text{Б} = 2\lg \frac{F_2}{F_1}$ при $F_2 = \sqrt{10}F_1$. Дольной единицей от бела является децибел, равный 0,1 Б.

Абсолютные шкалы широко используются в радиотехнических и электротехнических измерениях.

Шкалы интервалов и отношений называют метрическими (материальными). Абсолютные и метрические шкалы относятся к разряду линейных.

Контрольные вопросы

1. Определите основное понятие и предмет метрологии.
2. Что собой представляет структура метрологии. По какому признаку проводится классификация разделов метрологии?
3. Что отличает метрологию от других естественных наук (физики, химии)?

4. Дайте определение физической величины. Приведите примеры физических величин, относящихся к механике, оптике, электричеству, магнетизму.

5. Что является качественной характеристикой величины?

6. Что является количественной характеристикой величины?

7. Используя основное уравнение измерения, объясните, почему значение величины не зависит от выбора единиц измерений?

8. Является ли шкала наименований шкалой физических величин?

9. Объясните, почему на шкале порядка невозможно ввести единицу измерения.

10. Почему нельзя считать измерением определение значений величин с помощью шкал порядка?

11. Поясните, от каких величин зависит выбор начала отсчёта на шкале интервалов. Приведите примеры шкал интервалов.

Глава 2. Основы теории единства измерений

2.1. Основные понятия теории единства измерений

Единица величины – величина фиксированного размера, которой присвоено числовое значение, равное 1, определяемая и принимаемая по соглашению для количественного выражения однородных с ней величин [24].

Многообразие единиц величин на определённой ступени развития общества стало тормозить экономические, торговые и научные связи. Даже отдельные государства и их административные области для одних и тех же величин вводили свои единицы. В разных областях науки и техники появлялись свои (специфические) единицы, удобные только именно для этой отрасли. В связи с этим возникла тенденция к унификации единиц величин, необходимость в системах единиц, которые охватывали бы единицы величин как можно больших разделов науки и техники.

Система единиц величин – совокупность основных и производных единиц, вместе с их кратными и дольными единицами, определёнными в соответствии с установленными правилами для данной системы единиц [24].

Единица измерения, принятая по соглашению для основной величины, называется основной единицей системы единиц величин.

Единица измерения для производной величины – производная единица системы единиц величин.

Производная единица величины, которая для данной системы величин и для выбранного набора основных единиц, представляет собой произведение основных единиц, возведённых в степень, с коэффициентом пропорциональности, равным единице называется когерентной производной единицей величины.

2.2. Основы построения систем единиц физических величин

При построении или введении новой системы единиц учёные руководствуются только одним единственным принципом – практической целесообразностью, т. е. удобством применения единиц в деятельности человека. В основу этого принципа положены следующие базовые критерии:

- простота образования производных ФВ и их единиц, т. е. приравнивание к единице коэффициентов пропорциональности в уравнениях связи;
- высокая точность материализации основных и производных единиц и передачи их размера нижестоящим эталонам;
- неуничтожаемость эталонов основных единиц, т. е. возможность их воссоздания в случае утраты;
- преемственность единиц, сохранение их размеров и наименований при введении новой системы единиц, что связано с исключением материальных и психологических затрат;
- близость размеров основных и производных единиц к размерам ФВ, наиболее часто встречающихся в практике;
- долговременность хранения основных и производных единиц их эталонами;
- выбор в качестве основных минимального числа ФВ, отражающих наиболее общие свойства материи.

Приведенные критерии вступают в противоречие, поэтому путём соглашения выбирается наиболее выгодный для практики вариант.

При построении систем единиц физических величин выделяют два основных этапа:

- 1 этап – выбор основных единиц;
- 2 этап – образование производных единиц.

Последовательность расположения производных единиц должна удовлетворять при этом следующим условиям:

- 1) первой должна быть величина, которая выражается только через основные величины;

2) каждая последующая должна быть величиной, которая выражается только через основные и такие производные, которые ей предшествуют. Например, такая последовательность единиц: площадь, объём, плотность.

2.3. Международная система единиц величин

В 1832 г. Гауссом была разработана система единиц, названная им абсолютной. В этой системе, основными единицами являются миллиметр, миллиграмм и секунда. В дальнейшем по мере развития науки и техники возникали всё новые и новые системы, пока их обилие не стало тормозом научно-технического прогресса. В этих условиях IX Генеральная конференция по мерам и весам в 1960 г. приняла Международную систему единиц величин (СИ).

Основные принципы построения СИ:

- система базируется на основных единицах, которые являются независимыми друг от друга;
- производные единицы образуются по простейшим уравнениям связи, и для величины каждого вида устанавливается только одна единица СИ;
- система является когерентной;
- допускаются наряду с единицами СИ;
- в систему входят десятичные кратные и дольные единицы.

В качестве основных единиц СИ выбрано семь, которые приведены в табл. 3.

Метр равен длине пути, проходимого плоской электромагнитной волной в вакууме за $1/299792488$ долю секунды.

Килограмм равен массе международного прототипа килограмма – платиново-иридиевой гири.

Секунда равна интервалу времени $9192631770 T$, где T – период излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения внешними полями.

Основные единицы СИ

Величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение	
			международное	русское
<i>Основные</i>				
Длина	L	Метр	m	м
Масса	M	Килограмм	kg	кг
Время	T	Секунда	s	с
Сила электрического тока	I	Ампер	A	А
Термодинамическая температура	θ	Кельвин	K	К
Количество вещества	N	Моль	mol	моль
Сила света	J	Кандела	cd	кд

Ампер равен силе неизменяющегося электрического тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды, т. е. температуры, при которой три фазы воды – парообразная, жидкая и твердая – находятся в динамическом равновесии.

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. Число элементов, содержащихся в моле, называется постоянной Авогадро и равняется $6,022 \cdot 10^{23}$.

Кандела равна силе 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 [4].

Любая основная единица СИ, воспроизведенная в виде эталона, обеспечивает единство измерений не только собственной физической величины, но и всех производных величин, в формировании размерности которых она участвует.

Производные единицы системы СИ, наименования и обозначения которых образованы с использованием наименований и обозначений основных единиц СИ приведены в табл. 4.

Таблица 4

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

<i>Величина</i>		<i>Единица</i>		
<i>наименование</i>	<i>размерность</i>	<i>наименование</i>	<i>обозначение</i>	
			<i>международное</i>	<i>русское</i>
Площадь	L^2	квадратный метр	m^2	m^2
Объём, вместимость	L^3	кубический метр	m^3	m^3
Скорость	LT^{-1}	метр в секунду	m/s	м/с
Ускорение	LT^{-2}	метр на секунду в квадрате	m/s^2	m/c^2
Волновое число	L^{-1}	метр в минус первой степени	m^{-1}	m^{-1}
Плотность	$L^{-1}M$	килограмм на кубический метр	kg/m^3	$кг/м^3$
Удельный объём	L^3M^{-1}	кубический метр на килограмм	m^3/kg	$м^3/кг$
Плотность электрического тока	$L^{-2}I$	ампер на квадратный метр	A/m^2	$A/м^2$
Напряженность магнитного поля	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/m	$A/м$
Молярная концентрация компонента	$L^{-3}N$	моль на кубический метр	mol/m^3	моль/ m^3
Яркость	$L^{-2}J$	кандела на квадратный метр	cd/m^2	$кд/м^2$

Производные единицы системы СИ, имеющие специальное название, представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Производные единицы СИ, имеющие специальные
наименования и обозначения**

<i>Величина</i>	<i>размерность</i>	<i>наименование</i>	<i>Единица</i>		<i>выражение через основные и производные единицы СИ</i>
			<i>обозначение</i>	<i>международное русское</i>	
Плоский угол	1	радиан	rad	рад	$m \cdot m^{-1} = 1$
Телесный угол	1	стерадиан	sr	ср	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$
Частота	T^{-1}	герц	Hz	Гц	s^{-2}
Сила	LMT^{-2}	ньютон	N	Н	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
Давление	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Pa	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	джоуль	J	Дж	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Мощность	L^2MT^{-3}	ватт	W	Вт	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
Электрический заряд, количество электричества	TI	кулон	C	Кл	$s \cdot A$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	V	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$

Электрическая ёмкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	F	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ω	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сиemens	S	См	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Поток магнитной индукции, магнитный поток	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Wb	Вб	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	T	Тл	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	H	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Температура Цельсия	Θ	градус Цельсия	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	K
Световой поток	J	люмен	lm	лм	cd·sr
Освещённость	$L^{-2}J$	люкс	lx	лк	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность радионуклида)	T^{-1}	беккерель	Bq	Бк	s^{-1}
Поглощённая доза ионизирующего излучения, керма	L^2T^{-2}	грей	Gy	Гр	$m^2 \cdot s^{-2}$
Эквивалентная доза ионизирующего излучения, эффективная доза ионизирующего излучения	L^2T^{-2}	зиверт	Sv	Зв	$m^2 \cdot s^{-2}$
Активность катализатора	NT^{-1}	катал	kat	кат	$mol \cdot s^{-1}$

В данной системе наряду с единицами СИ допускаются к применению широко используемые на практике внесистемные единицы, примеры которых представлены в табл. 6.

Без ограничения срока допускается применять единицы относительных и логарифмических величин, некоторые из них указаны в табл. 7.

Кратные и дольные единицы СИ образуются умножением на степень числа 10, им присвоены определенные названия и обозначения (см. табл. 8).

Присоединение к наименованию и обозначению единицы двух или более приставок подряд не допускается.

В связи с тем, что наименование основной единицы массы – килограмм содержит приставку «кило-», для образования кратных и дольных единиц массы используют дольную единицу массы – грамм (0,001 кг), и приставки присоединяют к слову «грамм», например, миллиграмм (мг) вместо микрокилограмм (мккг).

Преимущества использования СИ:

- универсальность, т. к. она охватывает все области измерений;

- унификация единиц для всех видов измерений – применение одной единицы для данной физической величины, например, для давления, работы, энергии;

- единицы СИ по своему размеру удобны для практического применения;

- переход на нее повышает уровень точности измерений, т. к. основные единицы этой системы могут быть воспроизведены более точно, чем единицы других систем;

- это единая международная система и её единицы распространены.

Внесистемные единицы, допустимые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица				соотношение с единицей СИ	область применения
	наименование	обозначение		русское		
		международное				
Масса	тонна	t		т	$1 \cdot 10^3$ kg	все области
	атомная единица массы	u		а. е. м.	$1,6605402 \cdot 10^{-27}$ kg (приблизительно)	
Время	минута	min		мин	60 s	все области
	час	h		ч	3600 s	
	сутки	d		сут	86400 s	
Плоский угол	градус	°	°	°	$(\pi/180)$ rad = $1,745329 \dots \cdot 10^{-2}$ rad	все области
	минута	'	'	'	$(\pi/10800)$ rad = $2,908882 \dots \cdot 10^{-4}$ rad	
	секунда 2),4)	»	»	»	$(\pi/648000)$ rad = $4,848137 \dots \cdot 10^{-6}$ rad	
	град (гон)	gon	gon	град	$(\pi/200)$ rad = $1,57080 \dots \cdot 10^{-2}$ rad	

Наименование величины	Единица			область применения
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ	
Длина	астрономическая единица	ua	$1,49598 \cdot 10^{11}$ м (приблизительно)	астрономия
	световой год	ly	$9,4605 \cdot 10^{15}$ м (приблизительно)	
Оптическая сила	парсек	pc	$3,0857 \cdot 10^{16}$ м (приблизительно)	оптика
	диоптрия	–	$1 \cdot \text{m}^{-1}$	
Площадь	гектар	ha	$1 \cdot 10^4$ м ²	сельское и лесное хозяйство
	электрон-вольт	eV	$1,60218 \cdot 10^{-19}$ J (приблизительно)	
Энергия	киловатт-час	kW·h	$3,6 \cdot 10^6$ J	физика для счётчиков электрической энергии
	вольт-ампер	V·A		
Реактивная мощность	вар	var		электротехника электротехника
	ампер-час	A·h	$3,6 \cdot 10^3$ C	

Таблица 7

**Некоторые относительные и логарифмические величины
и их единицы**

<i>Наименование величины</i>	<i>наименование</i>	<i>Единица</i>		<i>значение</i>
		<i>обозначение</i>		
		<i>международное</i>	<i>русское</i>	
1. Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную): КПД; относительное удлинение; относительная плотность; деформация; относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости; магнитная восприимчивость; массовая доля компонента; молярная доля компонента и т. п.	единица процент промилле миллионная доля	1 % ‰ ppm	1 % ‰ млн ⁻¹	1 1·10 ⁻² 1·10 ⁻³ 1·10 ⁻⁶

Продолжение табл. 7

Наименование величины	Единица			значение
	наименование	обозначение		
		международное	русское	
2. Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную): уровень звукового давления; усиление, ослабление и т. п.	бел	В	Б	$1 \text{ В} = \lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = 10P_1$ $1 \text{ В} = 2 \lg(F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10} F_1$, где P_1 и P_2 – одноименные энергетические величины (мощность, энергия, плотность энергии и т. п.); F_1 и F_2 – одноименные «силовые» величины (напряжение, сила тока, напряжённость поля и т. п.)

3. Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную): уровень громкости	фон	r _{phon}	фон	1 r _{phon} равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 Hz равен 1 dB
4. Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную): частотный интервал	октава	–	окт	1 октава равна $\lg_2 (f_2/f_1)$ при $f_2/f_1 = 2$;
5. Логарифмическая величина (натуральный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную)	декада	–	дек	1 декада равна $\lg_2 (f_2/f_1)$ при $f_2/f_1 = 10$, где f_2, f_1 – частоты
	непер	N _p	N _p	1 N _p = 0,8686 ... B = 8,686 ... dB

Множители и приставки, используемые для образования наименований
и обозначений десятичных кратных и дольных единиц СИ

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

2.4. Воспроизведение и передача размера единиц

При проведении измерений необходимо обеспечить их единство.

Единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин или в значениях по установленным шкалам измерений, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

Понятие «единство измерений» довольно ёмкое. Оно охватывает важнейшие задачи метрологии: унификацию единиц величин, разработку систем воспроизведения величин и передачи их размеров рабочим средствам измерений с установленной точностью и ряд других вопросов.

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых проградуированы все существующие средства измерений одной и той же величины. Это достигается путём точного воспроизведения и хранения в специализированных учреждениях установленных единиц величин и передачи их размеров применяемым средствам измерений.

Воспроизведение единицы величины – совокупность операций по материализации единицы величины с помощью первичного эталона.

Существует три процедуры воспроизведения единицы величины. Первая состоит в физической реализации единицы измерения в соответствии с её определением. Вторая процедура состоит в использовании высокостабильного эталона, основанного на физическом явлении, как, например, в случае использования стабилизированных по частоте лазеров при воспроизведении метра, эффекта Джозефсона для вольта, квантового эффекта Холла для Ома. Третья процедура состоит в принятии материальной меры в качестве эталона. Это имеет место, например, в случае эталона 1 кг.

Различают воспроизведение основной и производной единиц.

Воспроизведение основной единицы – воспроизведение единицы путём создания фиксированной по размеру величины в соответствии с определением единицы.

Например, единица массы – 1 кг (точно) воспроизведена в виде платиноиридиевой гири, хранимой в Международном бюро мер и весов в качестве международного эталона килограмма. Розданные другим странам эталоны имеют номинальное значение 1 кг. На основании последних (1979) международных сличений платиноиридиевая гиря, входящая в состав Государственного эталона РФ, имеет массу 1,000000087 кг.

Воспроизведение производной единицы воспроизведение единицы величины в соответствии с уравнением связи между данной производной единицей и основными единицами.

Передача единицы величины – приведение размера величины, хранимой средством измерений, к единице величины, воспроизводимой или хранимой эталоном данной единицы величины или стандартным образцом.

Хранение единицы – совокупность операций, обеспечивающих неизменность во времени размера единицы, воспроизводимой, хранимой и передаваемой данным эталоном.

Хранение единицы осуществляется при соблюдении обязательных технических требований и требований к содержанию и применению эталона.

Хранение эталона единицы величины предполагает проведение взаимосвязанных операций, позволяющих поддерживать метрологические характеристики эталона в установленных пределах. При хранении первичного эталона выполняются регулярные его исследования, включая сличения с национальными эталонами других стран с целью повышения точности воспроизведения единицы и совершенствования методов передачи её размера.

2.5. Эталоны единиц физических величин

Технической основой обеспечения единства измерений является эталонная база.

Эталоны единиц величин подразделяют по подчинённости и уровням точности [7]. Классификация эталонов единиц величин представлена на рис. 7.

Эталон единицы величины – средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы измерений [24].

Исходный эталон – эталон, обладающий наивысшими метрологическими свойствами, передающий единицу величины или шкалу измерений подчиненным эталонам и имеющимся средствам измерений.

Поверочная схема – иерархическая структура, устанавливающая соподчинение эталонов, участвующих в передаче единицы или шкалы измерений от исходного эталона средствам измерений, утверждаемая в установленном порядке в виде нормативного документа.



Рис. 7. Классификация эталонов

Эталоны, стоящие в поверочной схеме ниже исходного эталона, называются подчиненными эталонами.

Первичный эталон – эталон, основанный на использовании первичной референтной методики измерений (или созданный как артефакт) и выбранный по соглашению.

Первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы измерений с наивысшей точностью, а метрологические свойства первичных эталонов единиц величин устанавливаются независимо от других эталонов единиц этих же величин.

Первичный эталон, воспроизводящий единицу величины в специфических условиях, называется первичный специальный эталон.

Вторичный эталон – эталон, получающий единицу величины или шкалу измерений непосредственно от первичного эталона данной единицы или шкалы.

Эталон, предназначенный для передачи единицы величины или шкалы измерений средствам измерений, называется рабочий эталон.

В случае необходимости передачи единицы величины большому числу средств измерений в рамках одной поверочной схемы передачу единицы осуществляют через цепочку подчинённых по разрядам (1, 2... n-й) рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в этой цепочке единицу передают средству измерений.

Перечень эталонов не повторяет перечня принятых единиц величин. Для ряда единиц эталоны не создаются. Это связано с отсутствием возможности непосредственного сравнения соответствующих величин.

Например, нет необходимости в эталоне площади, так как она не поддаётся непосредственному сравнению.

Эталоны единиц величин можно структурировать по областям и видам измерений следующим образом:

- измерения геометрических величин;
- измерения механических величин;
- измерения параметров потока, расхода, уровня и объёма;
- измерения давления, вакуумные измерения;
- измерения физико-химического состава и свойств веществ;

- теплофизические и температурные измерения;
- измерения времени и частоты;
- измерения электрических и магнитных величин, радиотехнические и радиоэлектронные измерения;
- измерения акустических величин;
- оптические и оптико-физические измерения;
- измерения характеристик ионизирующих излучений и ядерных констант.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной величиной, а также уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать, как минимум, тремя признаками: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

Неизменность – свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы величины в течение длительного интервала времени, а все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определёнными функциями величин, доступных точному измерению.

Реализация этих требований привела к идее создания «естественных эталонов» различных величин, основанных на присущих и воспроизводимых свойствах материального объекта или явления. Например: естественный эталон разности электрических потенциалов, основанный на эффекте Джозефсона; эталон электрического сопротивления, основанный на квантовом эффекте Холла.

Воспроизводимость – возможность воспроизведения единицы величины на основе её теоретического определения с наименьшей погрешностью для данного уровня развития измерительной техники.

Это свойство достигается путём постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения введением соответствующих поправок.

Сличаемость – возможность обеспечения сличения с эталоном других средств измерения, нижестоящих по поверочной

схеме, и, в первую очередь, вторичных эталонов с наивысшей точностью для данного уровня развития техники измерения.

Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений при проведении сличений.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение единицы измерения.
2. Дайте определение системы единиц величин.
3. Проведите классификацию величин по степени условной независимости от других величин данной группы величин.
4. Приведите примеры основных и производных величин.
5. Дайте определение кратных и дольных единиц. Приведите примеры.
6. Сформулируйте принципы построения системы единиц величин.
7. Определите суть понятия «единство измерений».
8. Дайте определение понятия эталон единицы величины.
9. Совпадает ли перечень существующих эталонов и перечень принятых величин?
10. Какими признаками должен обладать эталон? Поясните суть этих признаков.
11. Перечислите основные виды эталонов. В чём состоит их различие?
12. Дайте определение понятия «поверочная схема».
13. Назовите основные свойства эталонов.

Глава 3. Основы теории измерений

3.1. Основные понятия теории измерений

Современное общество немислимо без измерений. Высокая точность управления полетами космических аппаратов достигнута благодаря современным средствам измерений, установленным как на космических аппаратах, так и на Земле.

В производственной деятельности измерения служат обеспечению взаимозаменяемости и совместимости деталей компонентов изделий, позволяют вести контроль технологических процессов и качества продукции.

В настоящее время существует несколько стандартных определений термина «измерения».

В соответствии с Федеральным законом от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»: измерение – совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины.

РМГ 29-2013 даёт следующее определение понятия «измерение» – процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине [24]. В соответствии с данным определением измерение подразумевает сравнение величин или включает счёт объектов, а также предусматривает описание величины в соответствии с предполагаемым использованием результата измерения, методику измерений и средство измерений, функционирующее в соответствии с регламентированной методикой измерений и с учётом условий измерений.

3.2. Постулаты теории измерений

Как и любая другая наука, метрология строится на основе ряда основополагающих постулатов, описывающих её исходные аксиомы. Построению и исследованию этих аксиом – по-

студентов посвящено большое число научных исследований. Исследования в этой области ещё не закончены [27].

Первым постулатом метрологии является постулат α : в рамках принятой модели объекта исследования существует определенная измеряемая физическая величина и её истинное значение.

Если, например, считать, что деталь представляет собой цилиндр (модель – цилиндр), то она имеет диаметр, который может быть измерен. Если же деталь нельзя считать цилиндрической, например, её сечение представляет собой эллипс, то измерять её диаметр бессмысленно, поскольку измеренное значение не имеет полезной информации о детали. Следовательно, в рамках новой модели диаметр не существует. Измеряемая величина существует лишь в рамках принятой модели, то есть имеет смысл только до тех пор, пока модель признается адекватной объекту.

Так как при различных целях исследований данному объекту могут быть сопоставлены различные модели, то из постулата α вытекает следствие α_1 : для данной физической величины объекта измерения существует множество измеряемых величин (и соответственно их истинных значений).

Из первого постулата метрологии следует, что измеряемому свойству объекта измерений должен соответствовать некоторый параметр её модели. Данная модель в течение времени, необходимого для измерения, должна позволять считать этот её параметр неизменным. В противном случае измерения не могут быть проведены. Указанный факт описывается постулатом β : истинное значение измеряемой величины постоянно.

Выделив постоянный параметр модели, можно перейти к измерению соответствующей величины. Для переменной величины необходимо выделить или выбрать некоторый постоянный параметр и измерить его. В общем случае такой постоянный параметр вводится с помощью некоторого функционала. Примером таких постоянных параметров переменных во времени величин, вводимых посредством функционалов,

являются средневыпрямленные $Y_{св} = \frac{1}{T} \int_0^T |Y(t)| dt$ или среднеквадратические значения $Y_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Y^2(t) dt}$.

Данный аспект отражается в следствии β_1 : для измерения переменной физической величины необходимо определить её постоянный параметр – измеряемую величину.

При построении математической модели объекта измерения неизбежно приходится идеализировать те или иные его свойства. Модель никогда не может полностью описывать все свойства объекта измерений. Она отражает с определённой степенью приближения некоторые из них, имеющие существенное значение для решения данной измерительной задачи. Модель строится до измерения на основе априорной информации об объекте и с учётом цели измерения. Измеряемая величина определяется как параметр принятой модели, а его значение, которое можно было бы получить в результате абсолютно точного измерения, принимается в качестве истинного значения данной измеряемой величины. Эта неизбежная идеализация, принятая при построении модели объекта измерения, обуславливает неизбежное несоответствие между параметром модели и реальным свойством объекта, которое называется пороговым. Принципиальный характер понятия «пороговое несоответствие» устанавливается постулатом γ : существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта (пороговое несоответствие измеряемой величины). Пороговое несоответствие принципиально ограничивает достижимую точность измерений при принятом определении измеряемой величины.

Изменения и уточнения цели измерения, в том числе и такие, которые требуют повышения точности измерений, приводят к необходимости изменять или уточнять модель объекта измерений и переопределять понятие измеряемой величины. Основной причиной переопределения является то, что пороговое несоответствие ранее принятого определения не позволяет повысить точность измерения до уровня требуемой.

Вновь введенный измеряемый параметр может также быть измерен лишь с погрешностью, которая в лучшем случае равна погрешности, обусловленной пороговым несоответствием. Поскольку принципиально невозможно построить абсолютно адекватную модель объекта измерения, то нельзя устранить пороговое несоответствие между измеряемой величиной и описывающим её параметром модели объекта измерений. Отсюда вытекает важное следствие γ_1 : истинное значение измеряемой величины отыскать невозможно.

На практике удовлетворяются приближенным решением. Для этого используют результаты специального исследования, называемого метрологической аттестацией средства измерения и методики выполнения измерений.

Главной особенностью измерительной процедуры является то, что при её повторении из-за случайного характера погрешности измерения Δ отсчёт q , например, по шкале отношений получается все время разным. Это фундаментальное положение является законом природы. Отсчёт можно описать словами или математическими символами, аналитическим выражением, представить массивом экспериментальных данных в виде таблицы, графика. На основании громадного опыта практических измерений, накопленных к настоящему времени, может быть сформулировано следующее утверждение, называемое основным постулатом метрологии: отсчёт q является случайным числом. На этом постулате, который легко поддаётся проверке и остается справедливым в любых областях и видах измерений, основана вся метрология.

Модель можно построить только при наличии априорной информации об объекте измерения. При этом, чем больше информации, тем более адекватной будет модель и соответственно точнее и правильнее будет выбран её параметр, описывающий измеряемую ФВ. Следовательно, увеличение априорной информации уменьшает пороговое несоответствие. Данная ситуация отражается в следствии γ_2 : достижимая точность измерения определяется априорной информацией об объекте измерения.

Из этого следствия вытекает, что при отсутствии априорной информации измерение принципиально невозможно. В то же время максимально возможная априорная информация заключается в известной оценке измеряемой величины, точность которой равна требуемой. В этом случае необходимости в измерении нет. Таким образом, измерение обусловлено дефицитом количественной информации о том или ином свойстве объекта или явления и направлено на его уменьшение.

Аксиома метрологии: измерение есть ни что иное, как сравнение. Вторая аксиома метрологии относится к процедуре измерения и говорит о том, что нет иного экспериментального способа получения информации о каких бы то ни было размерах, кроме как путём сравнения их между собой.

Народная мудрость – всё познается в сравнении. И высказывание Леонарда Эйлера: «Невозможно определить или измерить одну величину иначе как, приняв в качестве известной другую величину этого же рода и указав соотношение, в котором она находится с ней».

Следует отметить, что приведенные постулаты и их следствия являются лишь одной из попыток построить теоретический фундамент метрологии и их не следует считать истиной в конечной инстанции.

3.3. Основные характеристики измерений

Выделяют следующие основные характеристики измерений:

- 1) метод, которым проводятся измерения;
- 2) принцип измерений;
- 3) погрешность измерений;
- 4) точность измерений;
- 5) правильность измерений;
- 6) достоверность измерений.

1. Метод измерений – приём или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с её единицей или соотношения со шкалой в соответствии с реализованным принципом измерений.

Существует несколько критериев классификации методов измерений (см. рис. 8).

По способу получения значений измеряемых величин различают два основных метода измерений:

– метод непосредственной оценки – метод измерения, при котором значение величины определяют непосредственно по отсчётному устройству измерительного прибора прямого действия (измерение длины с помощью линейки или размеров деталей микрометром, угломером и т. д.);

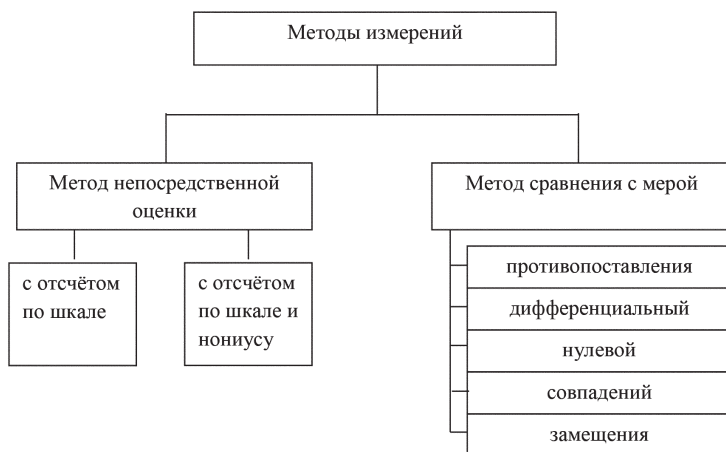


Рис. 8. Классификация методов измерения

– метод сравнения с мерой – метод измерения, при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями).

Существуют несколько разновидностей метода сравнения:

– метод противопоставления – метод сравнения, при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения. Например, взвешивание груза на равноплечих весах, когда измеряемая масса определяется как сумма масс гирь, её уравновешивающих, и показания по шкале весов;

– дифференциальный (разностный) метод – метод, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, незначительно отличающееся от значения измеряемой величины, и при котором измеряется разность между этими двумя величинами. Метод характеризуется измерением разности между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой. Метод позволяет получить результат высокой точности при использовании относительно грубых средств измерения. Например, измерения, выполняемые при проверке мер длины сравнением с эталонной мерой на компараторе;

– нулевой метод – метод сравнения, при котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля (измерение электрического сопротивления по схеме моста с полным его уравновешиванием). Нулевой метод аналогичен дифференциальному, но разность между измеряемой величиной и мерой сводится к нулю. При этом нулевой метод имеет то преимущество, что мера может быть во много раз меньше измеряемой величины;

– метод совпадений – метод сравнения, при котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, определяют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов (при измерении штангенциркулем используют совпадение отметок основной и нониусной шкал);

– метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. Например, взвешивание с поочерёдным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов (метод Борда).

По условиям измерения различают:

– контактный метод – метод измерения, основанный на том, что чувствительный элемент прибора приводится в контакт с объектом измерения. Например, измерение температуры тела термометром;

– бесконтактный метод – метод измерения, основанный на том, что чувствительный элемент прибора не приводится в контакт с объектом измерения. Например, измерение расстояния до объекта радиолокатором.

2. Принцип измерений – явление материального мира, положенное в основу измерения. Например, применение эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения; применение эффекта Пельтье для измерения поглощенной энергии ионизирующих излучений; использование гравитационного притяжения при измерении массы взвешиванием.

3. Погрешность измерения – это разность между результатом измерения величины и действительным значением этой величины (5)

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

Погрешность, как правило, возникает из-за недостаточной точности средств и методов измерения или из-за невозможности обеспечить идентичные условия при многократных наблюдениях.

4. Точность измерений – это характеристика, выражающая близость измеренного значения к истинному значению измеряемой величины.

Количественно точность измерений равна величине относительной погрешности в минус первой степени, взятой по модулю (6)

$$\varepsilon = \frac{1}{\delta}, \quad (6)$$

где δ – относительная погрешность.

5. Правильность измерения – характеристика качества измерений, отражающая близость среднего арифметического бесконечно большого числа повторно измеренных значений величины к опорному значению величины. Данная характеристика зависит, как правило, от точности средств измерений.

Основной характеристикой измерений является достоверность измерений.

Достоверность измерений – это характеристика, определяющая степень доверия к полученным результатам измерений.

По данной характеристике измерения делятся на достоверные и недостоверные. Достоверность измерений зависит от того, известна ли вероятность отклонения результатов измерения от настоящего значения измеряемой величины. Если достоверность измерений не определена, то результаты таких измерений, как правило, не используются. Достоверность измерений ограничена сверху погрешностью измерений.

3.4. Классификация измерений

Классификация измерений, т. е. подразделение этого понятия на группы, обуславливается удобством при разработке методик выполнения измерений и обработки результатов. Измерения могут быть классифицированы по ряду признаков (см. рис. 9).

Классификация по общим приемам получения результатов измерений получила наибольшее распространение. Согласно этому признаку, измерения делятся на прямые, косвенные, совместные и совокупные. Целью такого деления является удобство выделения методических погрешностей измерений, возникающих при определении результатов измерений.

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно от средства измерений. Например, измерение длины детали микрометром, измерение массы на весах, измерение силы тока амперметром.

Косвенное измерение – измерение, при котором искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной. Например, определение сопротивления проводника по плотности и геометрическим размерам.

Совместное измерение – проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Например, зависимость длины тела от температуры, зависимость электрического сопротивления проводника от давления.

Совокупное измерение – проводимые одновременно измерения нескольких однородных величин, при которых искомые значения величин определяют путём решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях. Для определения значений искомых величин число уравнений должно быть не меньше числа величин. Например, значение массы отдельных гирь набора.

По отношению к изменению измеряемой величины измерения делятся на статические и динамические. Целью данной классификации является возможность принятия решения о том, нужно ли при конкретных измерениях учитывать скорость изменения измеряемой величины или нет. Погрешности, вызываемые влиянием скоростей изменения измеряемой величины, называются динамическими.

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

Динамическое измерение – измерение, при котором средства измерений используют в динамическом режиме.

Динамический режим использования средства измерений – режим использования средства измерений, связанный с изменениями условий за время проведения измерительного эксперимента, которые влияют на результат измерения, в т. ч. изменение измеряемой величины.

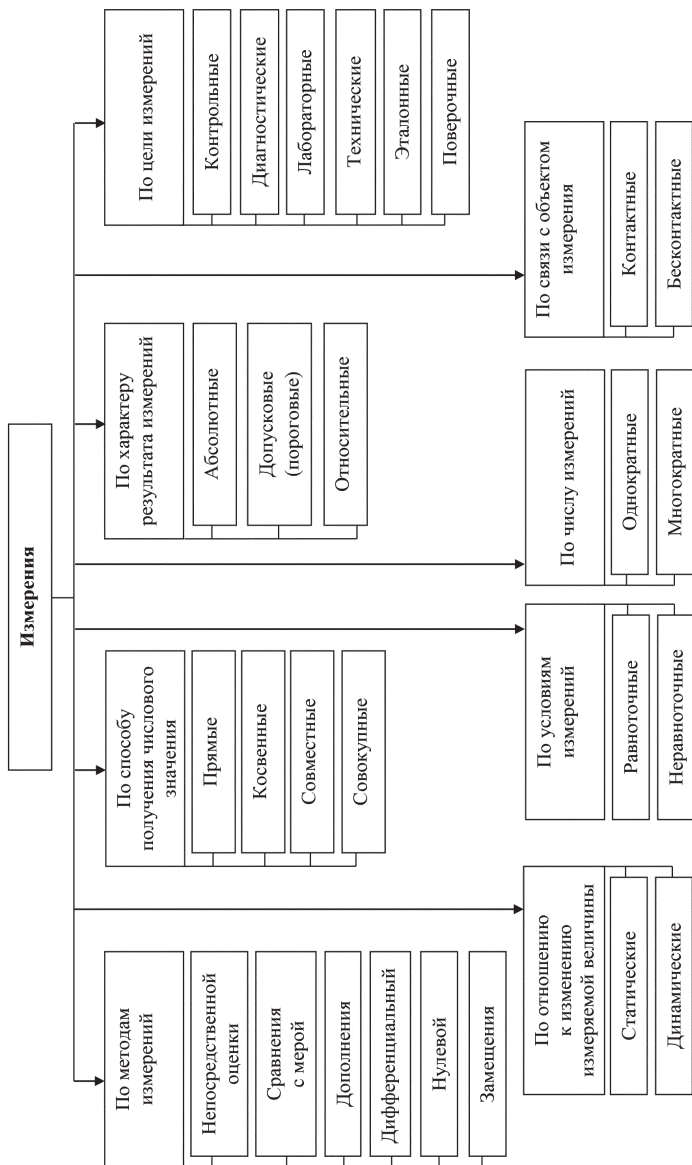


Рис. 9. Классификация измерений

Признаком, по которому измерение относят к статическому или динамическому, является динамическая погрешность при данной скорости или частоте изменения измеряемой величины и заданном режиме использования средств измерений. Предположим, что она пренебрежимо мала (для решаемой измерительной задачи). В этом случае измерение можно считать статическим. При невыполнении указанных требований оно является динамическим.

В зависимости от метрологического назначения измерения делятся на технические и метрологические. Технические измерения проводятся рабочими средствами измерений. Метрологические измерения выполняются при помощи эталонов с целью воспроизведения единиц величин для передачи их размера рабочим средствам измерений.

При метрологических измерениях в обязательном порядке учитываются погрешности, а при технических – принимается наперед заданная погрешность, достаточная для решения данной практической задачи. Поэтому при технических измерениях нет необходимости определять и анализировать погрешности получаемых результатов. Технические измерения являются наиболее массовым видом.

Измерения также разделяют в зависимости от выражения результатов измерений на абсолютные и относительные.

Абсолютное измерение – измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и использовании значений физических констант. Например, измерение силы основано на измерении основной величины – массы m и использовании физической постоянной g – ускорения свободного падения в точке измерения массы.

Относительное измерение – измерение отношения одноименных величин или функций этого отношения. Например: измерение активности радионуклида в источнике по отношению к активности радионуклида в однотипном источнике, аттестованном в качестве образцовой меры активности. Относительные измерения при прочих равных условиях могут быть выполнены более точно, чем абсолютные, поскольку в суммарную погрешность не входит погрешность меры величины.

3.5. Основные операции измерения

Информация, получаемая в результате измерения, может содержаться в объекте измерения в двух формах: пассивной или активной. Информация является активной, когда она имеет форму энергетической характеристики того или иного явления. Такие информационные энергетические явления называются сигналами. Примерами сигналов служат электрические, оптические и акустические явления, используемые для передачи информации. Остальная информация относится к пассивной, например, информация о значении электрической проводимости раствора электролита, о составе вещества и т. д.

Мы не имеем доступа к пассивной информации, пока она не преобразована в активную форму. Для этого необходим внешний источник энергии, чтобы возбудить или активизировать соответствующие пассивные свойства данного объекта. Этот возбудитель оказывает воздействие на объект измерения, который, в свою очередь, так или иначе, откликается на него. Если известно воздействие, то для того, чтобы узнать свойства объекта, нужно лишь измерить отклик. Фактически отклик содержит активную информацию, как об измеряемом объекте, так и о воздействии. Если воздействие не известно, то для извлечения той части пассивной информации, которая активизирована данным воздействием, необходимо осуществить измерение как отклика, так и самого воздействия. Следовательно, теперь активную информацию можно регистрировать имеющимися техническими средствами. Точно так же, как и люди, технические системы при наличии связи между ними обмениваются информацией в активной форме.

Предположим, что с помощью используемых для измерения технических средств, можно определять отношение двух физических величин при условии, что они имеют одну и ту же физическую размерность. Однако не всегда воздействие и отклик обязательно должны иметь одинаковую физическую размерность. Поэтому необходим эталон, который характеризуется точно известным соотношением между воздействием

и откликом. Эталон даёт возможность проводить измерения с «пассивным» объектом.

Для активного объекта не требуется возбудитель; однако снова нужен эталон, чтобы для данного объекта измерить то или иное отношение. Такой эталон должен давать хорошо известный сигнал той же размерности, что и измеряемый сигнал. Это могут быть либо внешние источники опорных сигналов, либо эталоны, встроенные в измерительную систему.

Пример. Стрелочный прибор с подвижной катушкой, в котором отклонение стрелки линейно зависит от входного тока x (в предположении, что $y = 0$ при $x = 0$), служит измерителем отношения. Если с помощью этого прибора должно быть выполнено кардинальное измерение, то требуется эталонный источник тока, значение которого известно точно. Другой возможный способ осуществления кардинального измерения заключается в использовании амперметра с точно калиброванной шкалой. В последнем случае по шкале можно узнать фактическую величину тока, можно сказать, что такой измеритель имеет внутренний эталон, роль которого играет чувствительность отклонения стрелки к току.

На основании понятия активной и пассивной информации, все измеряемые величины делятся на две группы:

– непосредственно измеряемые величины – величины, которые могут быть воспроизведены с заданными размерами и сравнимы с подобными, например, длина – линейкой, масса – весами, время – секундомером, часами;

– преобразуемые с заданной точностью в непосредственно измеряемые величины, например, концентрация электролита в его электрическую проводимость. Такое преобразование осуществляется с помощью операции измерительного преобразования.

В соответствии с основным уравнением измерения суть простейшего прямого измерения состоит в сравнении размера величины Q с размерами выходной величины регулируемой многозначной меры $q[Q]$ [27]. Условием реализации процедуры прямого измерения является выполнение следующих элементарных операций:

- 1) измерительного преобразования измеряемой величины X в другую величину Q , однородную или неоднородную с ней;
- 2) воспроизведения величины Q_M заданного размера $N[Q]$, однородной преобразованной величиной Q ;
- 3) сравнения однородных величин: преобразованной Q и воспроизводимой мерой $Q_M = N[Q]$.

Структурная схема измерения представлена на рис. 10.

Для получения результата измерения необходимо обеспечить выполнение при $N = q$ условия (7)

$$\Delta = Q - q[Q] = F(X) - q[Q] = \min(F[X] - N[Q]), \quad (7)$$

т. е. погрешность сравнения величин Q и Q_M должна быть минимизирована. В этом случае результат измерений находится как, где F^{-1} – операция, обратная операции F , осуществляемой при измерительном преобразовании.

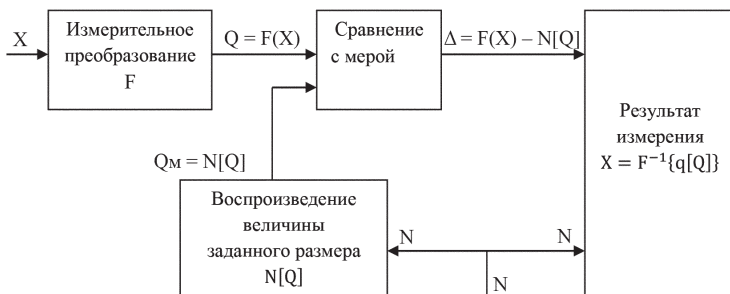


Рис. 10. Структурная схема измерения

Измерительное преобразование – операция, при которой устанавливается взаимно-однозначное соответствие между размерами в общем случае неоднородных преобразуемой и преобразованной величин. Измерительное преобразование описывается уравнением вида $Q = F(X)$, где F – некоторая функция или функционал, т. е. правило, по которому функции сопоставляется число, например, $c = \int_0^T f(t)dt$ или $\bar{x} = \sum_i \frac{x_i}{n}$. Однако чаще стремятся сделать преобразование линейным: $Q = KX$, где K – постоянная величина.

Основное назначение измерительного преобразования – получение и, если это необходимо, преобразование информации об измеряемой величине. Его выполнение осуществляется на основе выбранных физических закономерностей. В измерительное преобразование в общем случае могут входить следующие операции:

1. Изменение физического рода преобразуемой величины.
2. Масштабное линейное преобразование.
3. Масштабно-временное преобразование.
4. Нелинейное или функциональное преобразование.
5. Модуляция сигнала.
6. Дискретизация непрерывного сигнала.
7. Квантование.

Операция измерительного преобразования осуществляется посредством *измерительного преобразователя* – технического устройства, построенного на определённом физическом принципе и выполняющего одно частное измерительное преобразование.

Воспроизведение физической величины, заданного размера $N[Q]$ – это операция, которая заключается в создании требуемой величины, с заданным значением, известным с оговоренной точностью. Операцию воспроизведения величины определённого размера можно формально представить как преобразование кода N в заданную величину Q_m , основанное на единице данной величины $[Q]$: $Q_m = N[Q]$.

Степень совершенства операции воспроизведения величины заданного размера определяется постоянством размера каждой ступени квантования меры $[Q]$ и степенью многозначности, т. е. числом N воспроизводимых известных значений. С наиболее высокой точностью воспроизводятся основные величины: длина, масса, время, частота, напряжение и ток.

Средство измерений, предназначенное для воспроизведения величины заданного размера, называется *мерой*.

Сравнение измеряемой величины с величиной, воспроизводимой мерой Q_m – это операция, заключающаяся в установлении отношения этих двух величин: $Q > Q_m$, $Q < Q_m$ или

$Q = Q_M$. Точное совпадение сравниваемых величин, как правило, не встречается в практике измерений. Это обусловлено тем, что величина, воспроизводимая мерой, является квантованной и может принимать значения, кратные единице $[Q]$. В результате сравнения близких или одинаковых величин Q и q_M может быть лишь установлено, что $[Q - Q_M] < [Q]$.

3.6. Структурные элементы измерения

Измерение – сложный процесс, включающий в себя взаимодействие целого ряда его структурных элементов (см. рис. 11).

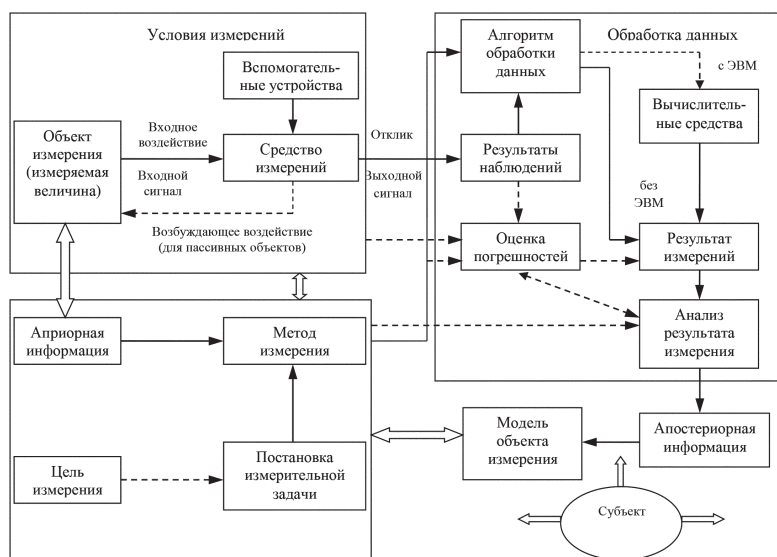


Рис. 11. Обобщённая структурная схема измерения

К ним относятся:

- цель измерения (измерительная задача);
- объект исследования и измеряемая величина;

- априорная и апостериорная информация;
- средство измерения;
- метод измерения;
- условия измерения;
- результат измерения;
- погрешность измерения;
- субъект измерения [29].

На рис. 10 стрелками обозначено направление взаимодействия отдельных структурных элементов измерения между собой. Сплошные линии указывают объекты измерения и связи между ними. Пунктирные линии – действия, осуществляемые в процессе измерения, и последовательность взаимодействия отдельных структурных элементов измерения.

К действиям относятся:

- постановка измерительной задачи;
- обработка данных, включающая оценку погрешностей и анализ результата измерения.

На схеме также указаны следующие дополнительные структурные элементы, без которых невозможно поставить измерительный эксперимент:

- измерительные принадлежности (вспомогательные устройства);
- результаты отдельных наблюдений;
- алгоритм обработки данных;
- вычислительные устройства, при помощи которых реализуются алгоритмы обработки данных.

Первым начальным элементом каждого измерения является его задача (цель). Задача любого измерения заключается в определении значения выбранной (измеряемой) величины с требуемой точностью в заданных условиях. Постановку задачи измерения осуществляет субъект измерения – человек. При постановке задачи конкретизируется объект измерения, в нём выделяется измеряемая величина и определяется (задаётся) требуемая погрешность измерения.

Объект измерения – материальный объект или явление, которые характеризуются одной или несколькими измеряе-

мыми и влияющими величинами. Например, вал, у которого измеряют диаметр.

Субъект измерения – человек принципиально не в состоянии представить себе объект целиком, во всем многообразии его свойств и связей. Вследствие этого взаимодействие субъекта с объектом возможно только на основе математической модели объекта.

Математическая модель объекта измерения – это совокупность математических символов (образов) и отношений между ними, которая адекватно описывает интересующие субъекта свойства объекта измерения.

Модель объекта измерения должна удовлетворять следующим требованиям:

- погрешность, обусловленная несоответствием модели объекту измерения, не должна превышать 10 % предельно допускаемой погрешности измерения;

- составляющая погрешности измерения, обусловленная нестабильностью измеряемой величины в течение времени, необходимого для проведения измерения, не должна превышать 10 % предельно допускаемой погрешности.

Если выбранная модель не удовлетворяет этим требованиям, то следует перейти к другой модели объекта измерений.

Априорная информация – информация об объекте измерения, известная до проведения измерения, является важнейшим фактором, обуславливающим его эффективность. При полном отсутствии этой информации измерение в принципе невозможно, так как неизвестно, что же необходимо измерить, а следовательно, нельзя выбрать нужные средства измерений. При наличии априорной информации об объекте в полном объёме, т. е. при известном значении измеряемой величины, измерения попросту не нужны. Указанная информация определяет достижимую точность измерений и их эффективность.

Измеряемая величина определяется как параметр принятой модели, а её значение, которое можно было бы получить в результате абсолютно точного эксперимента, принимается в качестве истинного значения данной величины. Идеализа-

ция, принятая при построении модели объекта измерения, обуславливает несоответствие параметра модели исследуемому свойству объекта. Это несоответствие называют пороговым. Обычно на практике из-за трудности оценивания пороговое несоответствие стремятся сделать пренебрежимо малым.

Цель построения модели объекта измерения состоит в выявлении конкретной величины, подлежащей определению, т.е. необходимо говорить не о модели объекта измерения в целом, а о модели его измеряемого свойства или измеряемой величине.

Модель объекта измерения необязательно должна быть математической. Её характер должен определяться видом и свойствами объекта измерений, а также целью измерений. Моделью может служить любое приближенное описание объекта, которое позволяет выделить параметр модели, являющийся измеряемой величиной и отражающий то свойство объекта измерений, которое необходимо оценить для решения измерительной задачи. Модель должна достаточно хорошо отражать две группы свойств величин объекта измерений: определяемые при измерении и влияющие на результат измерения.

Основной проблемой моделирования объектов измерений является выбор таких моделей, которые можно считать адекватно описывающими измеряемые величины данного объекта. Важно отметить, что адекватность модели обуславливается не только теми свойствами объекта, которые требуется определить в рамках данной измерительной задачи, но и теми, которые могут влиять на результаты измерения искомой величины.

Построение адекватных моделей объектов измерений до настоящего времени является сложной творческой и неформализуемой задачей. Её решение требует высокой квалификации, опыта и, естественно, инженерной интуиции. При этом зачастую приходится решать две взаимоисключающие задачи: модель должна адекватно отражать все свойства объекта, необходимые для решения измерительной задачи, и в то же время быть по возможности простой и содержать минимум параметров.

Метод измерения должен по возможности иметь минимальную погрешность и способствовать исключению систематических погрешностей или переводу их в разряд случайных.

Метод измерений реализуется в средстве измерений – техническом средстве, предназначенном для измерений и имеющем нормированные (установленные) метрологические характеристики.

По сути, под средством измерения следует понимать техническое средство, предназначенное для измерений и позволяющее решать измерительную задачу путём сравнения измеряемой величины с единицей или шкалой величины.

Средство измерений является обобщенным понятием, объединяющим самые разнообразные конструктивно законченные устройства, которые обладают одним из двух признаков:

- вырабатывают сигнал (показание), несущий информацию о размере (значении) измеряемой величины;

- воспроизводят величину заданного (известного) размера.

Объединение технических средств по этим двум признакам сделано только из соображений целесообразности общего метрологического анализа, удобства изложения и регламентации метрологических требований и правил, единых для всех видов средств измерений.

Конечной целью любого измерения является его результат – значение величины, полученное путём её измерения. Результат измерения представляется именованным или неименованным числом. Совместно с результатом измерений при необходимости приводят данные об условиях измерений.

При использовании термина «результат измерения» следует чётко указывать, к чему он относится:

- показанию средства измерения;
- исправленному или не исправленному результату;
- проводилось ли усреднение результатов нескольких измерений.

Следует отметить, что исправленным результатом измерений называется полученное с помощью средства измерения

значение величины и уточнённое путём введения в него необходимых поправок на действие предполагаемых систематических погрешностей. Результат измерения и оценка его погрешности находятся субъектом измерения с помощью вычислительных средств (ветвь реальности), работающих по определенному алгоритму обработки измерительной информации (модельная ветвь).

Качество измерений характеризуется точностью, достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью, а также размером допускаемых погрешностей.

Субъект измерения – человек – объединяет в себе обе ветви процесса измерения (реальности и отражения), активно воздействует на него и осуществляет:

- постановку измерительной задачи;
- сбор и анализ априорной информации об объекте измерения;
- анализ адекватности объекту измерения выбранной модели;
- обработку результатов измерений.

3.7. Условия проведения измерений

В процессе измерения важную роль играют условия измерения – совокупность влияющих величин, описывающих состояние окружающей среды и средства измерений.

Влияющая величина – это физическая величина, не измеряемая данным СИ, но оказывающая влияние на его результаты.

Изменение условий измерения приводит к изменению состояния объекта измерения. Это, в свою очередь, определяет влияние условий измерения на выделенную величину и через неё – на измеряемую величину и отклонение значения действительной величины от той, что была определена при формировании измерительной задачи. Влияние условий измерения на СИ проявляется в изменении его метрологических

характеристик. При этом та часть погрешности измерения, которая возникает из-за изменения условий, называется дополнительной погрешностью.

В соответствии с установленными для конкретных ситуаций диапазонами значений влияющих величин различают нормальные, рабочие и предельные условия измерений.

Нормальные условия измерений – условия, при которых влияющие величины имеют нормальные или находящиеся в пределах нормальной области значения.

Нормальная область значений влияющей величины – это область значений, в пределах которой изменением результата измерений под воздействием влияющей величины можно пренебречь в соответствии с установленными нормами точности.

Нормальные условия измерений задаются в нормативно-технической документации на средства измерений. При нормальных условиях определяется основная погрешность данного средства измерений.

В табл. 9 представлены номинальные значения ряда влияющих величин при нормальных условиях.

Таблица 9

**Номинальные значения влияющих величин
при нормальных условиях**

<i>№ п/п</i>	<i>Влияющая величина</i>	<i>Значение</i>
1	Температура для всех видов измерений, С (К)	20 (293)
2	Давление окружающего воздуха для измерения ионизирующих излучений, теплофизических, температурных, магнитных, электрических измерений, измерения давления и параметров движения, кПа (мм рт. ст.)	100 (750)
3	Давление окружающего воздуха для линейных, угловых измерений, измерения массы, силы света и измерений в других областях, кроме указанных в п. 2. кПа (мм рт. ст.)	101,3 (760)

Окнчание табл. 9

<i>№ п/п</i>	<i>Влияющая величина</i>	<i>Значение</i>
4	Относительная влажность воздуха для линейных, угловых измерений, измерений массы, измерений в спектроскопии, %	58
5	Относительная влажность воздуха для измерения электрического сопротивления, %	55
6	Относительная влажность воздуха для измерений температуры, силы, твёрдости, переменного электрического тока, ионизирующих излучений, параметров движения, %	65
7	Относительная влажность воздуха для всех видов измерений, %	60
8	Плотность воздуха, кг/м ³	1,2
9	Ускорение свободного падения, м/с ²	9,8
10	Магнитная индукция (Тл) и напряжённость электростатического поля (В·м) для измерений параметров движения, магнитных и электрических величин	0
11	Магнитная индукция и напряжённость электростатического поля для всех видов измерений, кроме указанных в п. 10	Соответствует характеристикам поля Земли в данном географическом районе
12	Частота питающей сети переменного тока, Гц	50 ± 1 %
13	Среднеквадратическое значение напряжения питающей сети переменного тока, В	220 ± 10 %

Рабочими называются условия измерений, при которых влияющие величины находятся в пределах своих рабочих областей.

Рабочая область значений влияющей величины – область, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность или изменение показаний средства измерения.

Пределные условия измерений – условия, характеризующиеся экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые средство измерения может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

3.8. Основные этапы измерения

Измерение – последовательность сложных и разнородных действий, состоящая из ряда этапов, представленных на рис. 12.



Рис. 12. Основные этапы измерений

Первым этапом любого измерения является постановка измерительной задачи. Он включает в себя:

- сбор данных об условиях измерения и исследуемой величине, т. е. накопление априорной информации об объекте измерения и её анализ;

- формирование модели объекта и определение измеряемой величины, что является наиболее важным, особенно при решении сложных измерительных задач. Измеряемая величина

на определяется с помощью принятой модели (её параметр или характеристика). В простых случаях, т. е. при измерениях невысокой точности, модель объекта в явном виде не выделяется, а пороговое несоответствие пренебрежимо мало;

– постановку измерительной задачи на основе принятой модели объекта измерения;

– выбор конкретных величин, посредством которых будет находиться значение измеряемой величины;

– формулирование уравнения измерения.

Вторым этапом процесса измерения является планирование измерения. В общем случае оно выполняется в следующей последовательности:

1) выбор методов измерений непосредственно измеряемых величин и возможных типов СИ;

2) априорная оценка погрешности измерения;

3) определение требований к метрологическим характеристикам средства измерения и условиям измерений;

4) выбор средства измерения в соответствии с указанными требованиями;

5) выбор параметров измерительной процедуры (числа наблюдений для каждой измеряемой величины, моментов времени и точек выполнения наблюдений);

6) подготовка средства измерения к выполнению экспериментальных операций;

7) обеспечение требуемых условий измерений или создание возможности их контроля.

Эти первые два этапа, являющиеся подготовкой к измерениям, имеют принципиальную важность, поскольку определяют конкретное содержание следующих этапов измерения. Подготовка проводится на основе априорной информации. Качество подготовки зависит от того, в какой мере она была использована. Эффективная подготовка является необходимым, но недостаточным условием достижения цели измерения. Ошибки, допущенные при подготовке измерений, с трудом обнаруживаются и корректируются на последующих этапах.

Третий, главный этап измерения – измерительный эксперимент, который (как правило) является отдельным измерени-

ем. В общем случае последовательность действий во время этого этапа следующая:

- 1) взаимодействие средств и объекта измерений;
- 2) преобразование сигнала измерительной информации;
- 3) воспроизведение сигнала заданного размера;
- 4) сравнение сигналов и регистрация результата.

Последний этап измерения – обработка экспериментальных данных. В общем случае она осуществляется в последовательности, которая отражает логику решения измерительной задачи:

- предварительный анализ информации, полученной на предыдущих этапах измерения;
- вычисление и внесение возможных поправок на систематические погрешности;
- формулирование и анализ математической задачи обработки данных;
- построение или уточнение возможных алгоритмов обработки данных, т. е. алгоритмов вычисления результата измерения и показателей его погрешности;
- анализ возможных алгоритмов обработки и выбор одного из них на основании известных свойств алгоритмов, априорных данных и предварительного анализа экспериментальных данных;
- проведение вычислений согласно принятому алгоритму, в итоге которых получают значения измеряемой величины и погрешностей измерений;
- анализ и интерпретация полученных результатов;
- запись результата измерений и показателей погрешности в соответствии с установленной формой представления.

Некоторые пункты данной последовательности могут отсутствовать при реализации конкретной процедуры обработки результатов измерений.

Задача обработки данных подчинена цели измерения и после выбора средства измерения однозначно вытекает из измерительной задачи и, следовательно, является вторичной.

Перечисленные этапы существенно различаются по выполняемым операциям и их трудоёмкости. В конкретных слу-

чаях соотношение и значимость каждого из этапов заметно варьируется. Для многих технических измерений вся процедура измерения сводится к экспериментальному этапу, поскольку анализ и планирование, включая априорное оценивание погрешности, выбор нужных методов и средств измерений осуществляются предварительно, а обработка данных измерений, как правило, минимизируется.

Выделение этапов измерения имеет непосредственное практическое значение – способствует своевременному осознанному выполнению всех действий и оптимальной реализации измерений. Это, в свою очередь, позволяет избежать серьёзных методических ошибок, связанных с переносом проблем одного этапа на другой.

Контрольные вопросы

1. Что такое экстенсивные и интенсивные величины? В чем их сходство и различие? Приведите примеры величин каждого вида.

3. Проанализируйте определения счёта, оценивания и измерения. Выделите их общие и отличительные признаки.

4. Назовите основные операции процедуры измерения. Расскажите, как они реализуются при измерении размера детали штангенциркулем.

5. Какие элементы процесса измерений принадлежат к ветви реального, а какие – к ветви отражения реальности? Как они соотносятся друг с другом?

6. Перечислите основные характеристики измерений.

7. Какие характеристики измерений описывают свойства качества измерений.

8. По каким признакам классифицируются методы измерений? Какие методы измерений вам известны?

9. Что такое результат измерения и чем он характеризуется?

10. Что такое условия измерений? Какие они бывают?

11. Сформулируйте основные этапы измерения применительно к процессу измерения микрометром диаметра детали.

12. Перечислите признаки, по которым могут быть классифицированы измерения. Расскажите о классификации измерений по каждому из названных признаков.

13. Дайте определения прямых, косвенных, совместных и совокупных измерений. Приведите примеры измерений каждого вида.

Глава 4. Основы теории погрешностей измерения

4.1. Основные понятия теории погрешностей

Качество средств и результатов измерений принято характеризовать, указывая их погрешности. Введение понятия «погрешность» требует определения и чёткого разграничения трёх основных понятий: истинного и действительного значения измеряемой величины и результата измерения.

Истинным называется значение величины, значение величины, которое соответствует определению измеряемой величины. Оно не зависит от средств нашего познания и является той абсолютной истиной, к которой мы стремимся, пытаясь выразить её в виде числовых значений. На практике это абстрактное понятие приходится заменять понятием «действительное значение».

Действительным называется значение величины, значение величины, полученное экспериментальным путём и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Результат измерения представляет собой множество значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной и существенной информацией.

Погрешность результата измерения – это разность между измеренным значением величины X и опорным значением величины Q (8)

$$\Delta X = X - Q. \quad (8)$$

Опорное значение (величины) – значение величины, которое используют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода.

Опорное значение величины может быть истинным значением величины, подлежащей измерению, в этом случае оно

неизвестно, или принятым значением величины, в этом случае оно известно.

Погрешность средства измерений – разность между показанием средства измерений и известным опорным (действительным) значением величины. Она характеризует точность средства измерений.

Понятия погрешности результата измерения и погрешности средства измерений во многом близки друг к другу и классифицируются по одинаковым признакам.

4.2. Классификация погрешностей измерения

Общая классификация погрешностей измерений представлена на рис. 13.

По характеру проявления погрешности измерений делятся на случайные, систематические, прогрессирующие и грубые погрешности или промахи.

Случайная погрешность – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений одного и того же размера величины, проведенных с одинаковой тщательностью в одних и тех же условиях. В появлении таких погрешностей, изображенных на рис. 14а, не наблюдается какой либо закономерности, они обнаруживаются при повторных измерениях одной и той же величины в виде некоторого разброса получаемых результатов.

Случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда присутствуют в результате измерения, однако их можно существенно уменьшить, увеличив число наблюдений. Описание случайных погрешностей возможно только на основе теории случайных процессов и математической статистики.

Для получения результата, минимально отличающегося от истинного значения измеряемой величины, проводят многократные измерения требуемой величины с последующей математической обработкой экспериментальных данных.

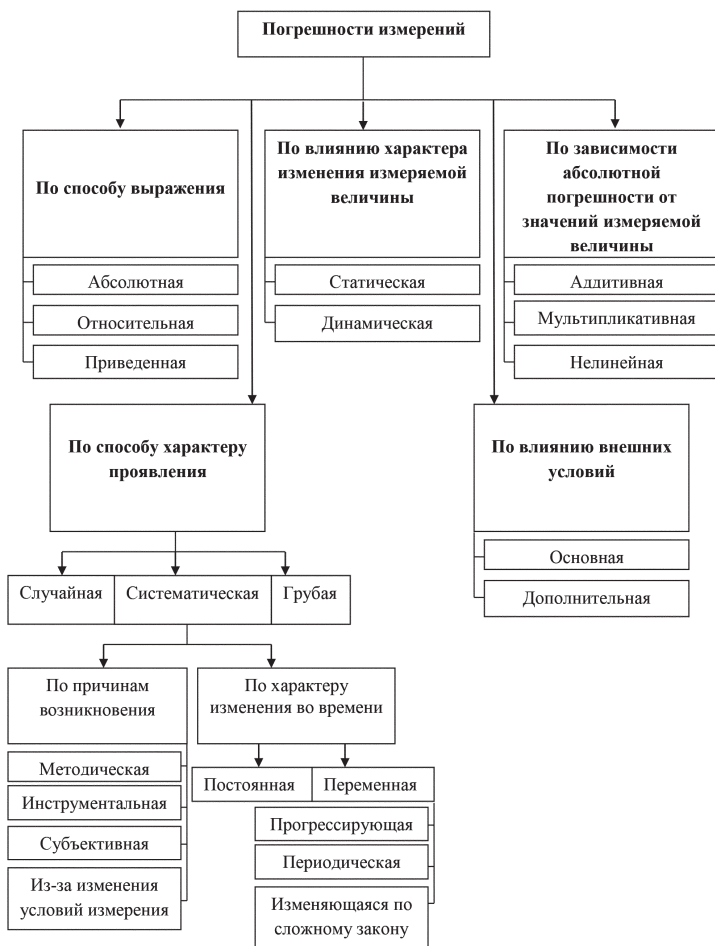


Рис. 13. Классификация погрешностей измерения

Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

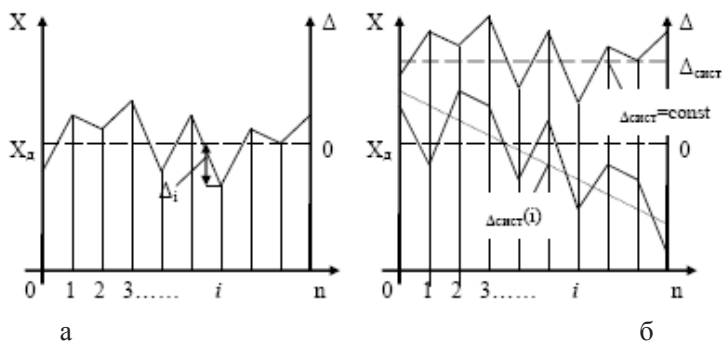


Рис. 14. Изменение:
 а – случайной; б – постоянной и переменной
 систематических погрешностей от измерения к измерению

В зависимости от характера изменения во времени систематические погрешности подразделяют на постоянные, прогрессирующие, периодические и погрешности, изменяющиеся по сложному закону. В зависимости от характера изменения по диапазону измерений систематические погрешности подразделяются на постоянные и пропорциональные.

Постоянные погрешности – погрешности, которые в течение длительного времени, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений, остаются постоянными (или – неизменными). Они встречаются наиболее часто.

Прогрессирующие погрешности – непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с деталью при контроле её прибором активного контроля.

Периодические погрешности – погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.

Погрешности, изменяющиеся по сложному закону, происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.

Пропорциональные погрешности – погрешности, значение которых пропорционально значению измеряемой величины.

Постоянная и переменная систематические погрешности показаны на рис. 14б. Их отличительный признак заключается в том, что они могут быть предсказаны, обнаружены и благодаря этому почти полностью устранены введением соответствующей поправки.

Грубая погрешность (промах) – это случайная погрешность результата отдельного наблюдения, входящего в ряд измерений; для данных условий она резко отличается от остальных результатов этого ряда.

По способу выражения различают абсолютную, относительную и приведённую погрешности.

Абсолютная погрешность измерения – погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины. Абсолютная погрешность описывается формулой $\Delta X = X - Q$ и выражается в единицах измеряемой величины. Однако она не может в полной мере служить показателем точности измерений, т. к. одно и то же её значение (например, $\Delta x = 0,05$ м при $x = 100$ м) соответствует достаточно высокой точности измерений, а при $x = 1$ м – низкой. Поэтому и вводится понятие относительной погрешности.

Относительная погрешность – погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к опорному значению измеряемой величины.

Границы относительной погрешности в долях или процентах находят из отношений $\delta = \frac{\Delta x}{x}$ или $\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%$, где Δx – границы абсолютной погрешности измерения, x – опорное или измеренное значение величины.

Из этих отношений находят относительную погрешность в долях измеряемой величины или процентах. Эта наглядная характеристика точности результата измерения (считают, что чем меньше погрешность измерения, тем больше его точность) не годится для нормирования погрешности средства измерения, т. к. при изменении значений x , относительная

погрешность принимает различные значения вплоть до бесконечности при $x = 0$. В связи с этим для указания и нормирования погрешности средства измерения используется ещё одна разновидность погрешности – приведенная.

Приведённая погрешность средства измерений – это относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность средства измерения отнесена к условно принятому значению x_N , постоянному во всём диапазоне измерений или его части: $\gamma = \frac{\Delta x}{x_N}$, или $\gamma = \frac{\Delta x}{x_N} \cdot 100 \%$.

Условно принятое значение x_N называют нормирующим. Чаще всего за него принимают верхний предел измерений данного средства измерения, применительно к которым и используется понятие «приведенная погрешность». Приведённую погрешность обычно выражают в процентах.

В зависимости от причин возникновения различают инструментальные погрешности измерения, погрешности метода измерений, погрешности из-за изменения условий измерения и субъективные погрешности измерения.

Инструментальная погрешность измерения обусловлена погрешностью применяемого средства измерения. Иногда эту погрешность называют аппаратной.

Погрешность метода измерений – составляющая систематической погрешности измерений из-за несовершенства принятого метода измерений, эта погрешность обусловлена:

- отличием принятой модели объекта измерения от модели, адекватно описывающей его свойства, которое определяется путём измерения;

- влиянием способов применения средства измерения. Это имеет место, например, при измерении напряжения вольтметром с конечным значением внутреннего сопротивления. В таком случае вольтметр шунтирует участок цепи, на котором измеряется напряжение, и оно оказывается меньше, чем было до присоединения вольтметра;

- влиянием алгоритмов (формул), по которым производятся вычисления результатов измерений. Вследствие упрощений, принятых в уравнениях для измерений, нередко возни-

кают существенные погрешности, для компенсации действия которых следует вводить поправки. Иногда погрешность метода называют теоретической погрешностью;

– влиянием других факторов, не связанных со свойствами используемых средств измерений.

Отличительной особенностью погрешностей метода является то, что они не могут быть указаны в документации на используемое средство измерения, поскольку от него не зависят; их должен определять оператор в каждом конкретном случае. В связи с этим оператор должен чётко различать фактически измеряемую им величину и величину, подлежащую измерению. Иногда погрешность метода может проявляться как случайная.

Погрешность (измерения) из-за изменения условий измерения – это составляющая систематической погрешности измерения, являющаяся следствием неучтенного влияния отклонения в одну сторону какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений, от установленного значения.

Этот термин применяют в случае неучтенного или недостаточно учтенного действия той или иной влияющей величины (температуры, атмосферного давления, влажности воздуха, напряжённости магнитного поля, вибрации и др.); неправильной установки средств измерений, нарушения правил их взаимного расположения и др.

Субъективная (личная) погрешность измерения обусловлена погрешностью отсчёта оператором показаний по шкалам средств измерений, диаграммам регистрирующих приборов. Она вызвана состоянием оператора, его положением во время работы, несовершенством органов чувств, эргономическими свойствами средств измерений.

По зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины различают погрешности: аддитивные Δ_a , не зависящие от измеряемой величины; мультипликативные Δ_m , которые прямо пропорциональны измеряемой вели-

чине, и нелинейные $\Delta_{\text{н}}$, имеющие нелинейную зависимость от измеряемой величины. Данная классификационная группа погрешностей представлена на рис. 15.

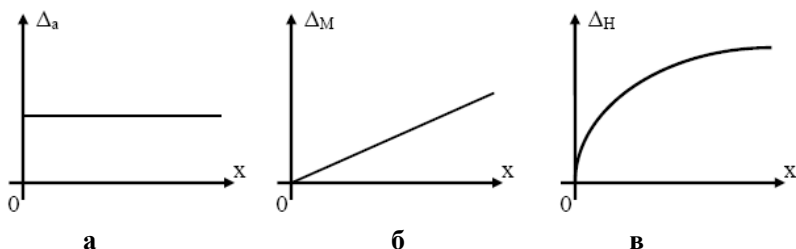


Рис. 15. Классификационная группа погрешностей по зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины: а – аддитивная; б – мультипликативная; в – нелинейная погрешности

Эти погрешности применяют в основном для описания метрологических характеристик средств измерений. Такое их разделение весьма существенно при решении вопроса о нормировании и математическом описании погрешностей средств измерений.

По влиянию внешних условий различают основную и дополнительную погрешности средств измерений. Основная погрешность средства измерений – погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях. Для каждого средства оговариваются условия эксплуатации, при которых нормируется его погрешность. Дополнительная погрешность средства измерений – составляющая погрешности средства измерения, возникающая дополнительно к основной погрешности, вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального её значения или вследствие её выхода за пределы нормальной области значений.

В зависимости от влияния характера изменения измеряемых величин погрешности средств измерения, делят на статические и динамические.

Статической называется погрешность средства измерений, применяемого для измерения величины, принимаемой за неизменную.

Динамической называется погрешность средства измерения, возникающая дополнительно при измерении изменяющейся в процессе измерений величины. Динамическая погрешность СИ обусловлена несоответствием его реакции на скорость изменения измеряемого сигнала.

4.3. Систематические погрешности и способы их обнаружения и устранения

Систематические погрешности искажают результат измерений, поэтому их необходимо исключать из результата измерения путём введения поправок или регулировкой прибора с доведением систематических составляющих погрешности до минимума.

В метрологической практике при оценке систематических погрешностей должно учитываться влияние следующих основных составляющих процесса измерения:

1. Объект измерения – перед измерением он должен быть достаточно хорошо изучен с целью корректного выбора его модели. Чем полнее модель соответствует объекту, тем точнее могут быть получены результаты измерения.

2. Субъект измерения – его вклад в погрешность измерения необходимо уменьшать путём подбора операторов высокой квалификации и соблюдения требований эргономики при разработке средства измерения.

3. Метод и средство измерений – их правильный выбор чрезвычайно важен и производится на основе априорной информации об объекте измерения. Чем больше априорной информации, тем точнее может быть проведено измерение. Основным вклад в систематическую погрешность вносит, как правило, методическая погрешность.

4. Условия измерения – обеспечение и стабилизация нормальных условий являются необходимыми требованиями для минимизации дополнительной погрешности, которая по своей природе, как правило, является систематической.

Существует также понятие *неисключенная систематическая погрешность* – составляющая погрешности результата измерений, обусловленная погрешностями вычисления и введения поправок на влияние систематических погрешностей или систематической погрешностью, поправка на действие которой не введена вследствие её малости [24].

Иногда этот вид погрешности называют неисключенным остатком систематической погрешности. Неисключенная систематическая погрешность характеризуется её границами. Границы неисключенной систематической погрешности Θ при числе слагаемых $N \leq 3$ вычисляют по формуле (9)

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^N |\theta_i|, \quad (9)$$

где θ_i – граница i -й составляющей неисключенной систематической погрешности.

При числе неисключенных систематических погрешностей $N \geq 4$ вычисления проводят по формуле (10)

$$\Theta = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^N \theta_i^2}, \quad (10)$$

где K – коэффициент зависимости отдельных неисключенных систематических погрешностей.

Все перечисленные составляющие систематических погрешностей вызывают искажение результата измерений. Наибольшую опасность в этом отношении имеют не выявленные систематические погрешности, которые могут быть причиной ошибочных научных выводов, неудовлетворительной конструкции средства измерения и снижения качества продукции в производстве.

Результаты наблюдений, полученные при наличии систематической погрешности, называются неисправленными. При

проведении измерений стараются в максимальной степени исключить или учесть влияние систематических погрешностей. Это может быть достигнуто следующими путями:

– устранением источников погрешностей до начала измерений. В большинстве областей измерений известны главные источники систематических погрешностей и разработаны методы, исключающие их возникновение или устраняющие их влияние на результат измерения. В связи с этим в практике измерений стараются устранить систематические погрешности не путём обработки экспериментальных данных, а применением средств измерений, реализующих соответствующие методы измерений;

– определением поправок и внесением их в результат измерения;

– оценкой границ неисключенных систематических погрешностей.

Постоянная систематическая погрешность не может быть найдена методами совместной обработки результатов измерений. Однако она не может исказить ни показатели точности измерений, характеризующие случайную погрешность, ни результат нахождения переменной составляющей систематической погрешности. Действительно, результат одного измерения (11)

$$x_i = Q + \Delta_i + \theta_i, \quad (11)$$

где Q – истинное значение измеряемой величины; Δ_i – i -я случайная погрешность; θ_i – i -я систематическая погрешность. После усреднения результатов многократных измерений получаем среднее арифметическое значение измеряемой величины (12)

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = Q + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i, \quad (12)$$

Если систематическая погрешность постоянна во всех измерениях, т. е. $\theta_i = \theta$, то (13)

$$\bar{X} = Q + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i + \theta. \quad (13)$$

Таким образом, постоянные систематические погрешности не устраняются при многократных измерениях. Они могут быть обнаружены лишь путём сравнения результатов измерений с другими, полученными с помощью более высокоточных методов и средств. Иногда эти погрешности можно устранить специальными приёмами проведения процесса измерений, которые рассматриваются далее.

Наличие существенной переменной систематической погрешности искажает оценки характеристик случайной погрешности и аппроксимацию её распределения. Поэтому она должна обязательно выявляться и исключаться из результатов измерений.

Для устранения постоянных систематических погрешностей применяют следующие методы:

1. Метод измерений замещением, являющийся разновидностью метода сравнения с мерой. Сравнение осуществляется замещением измеряемой величины мерой с известным значением величины, причём так, что при этом в состоянии и действии всех используемых средств измерений не происходит никаких изменений. Например, взвешивание на пружинных весах, у которых имеется постоянная систематическая погрешность из-за смещения шкалы. Взвешивание производится в два приёма (см. рис. 15).

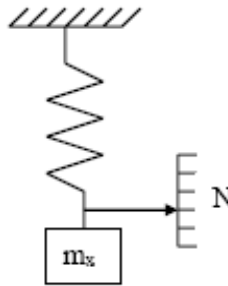


Рис. 16. Реализация метода измерений замещением (метод Борда)

Сначала на чашу весов помещают взвешиваемое тело массой m_x и отмечают положение указателя (на отметке N). Затем взвешиваемое тело замещают гирями такой массы m_0 , чтобы вновь добиться прежнего отклонения указателя N . Очевидно, что при одинаковых отклонениях указателя будет выполняться условие $m_x = m_0$, и систематическая погрешность весов не скажется на результате взвешивания. Такой способ взвешивания с поочерёдным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов называется методом Борда.

2. Метод противопоставления, также являющийся разновидностью метода сравнения с мерой, при котором измерение выполняется дважды и проводится так, чтобы в обоих случаях причина постоянной погрешности оказывала на результат наблюдений разные, но известные по закономерности воздействия. Например, взвешивание на равноплечих весах (см. рис. 17).

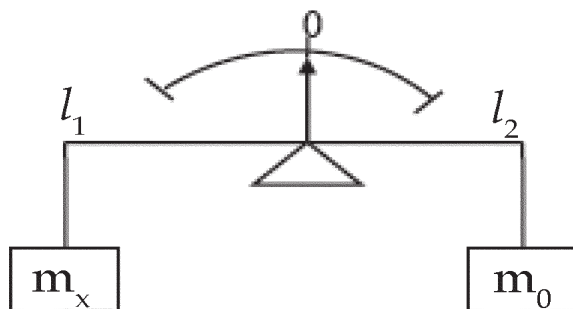


Рис. 17. Реализация метода противопоставления

Условие равновесия весов выглядит следующим образом: $m_x \cdot l_1 = m_0 \cdot l_2$, где m_x – масса взвешиваемого груза; m_0 – масса уравновешивающих гирь; l_1 и l_2 – соответствующие плечи коромысла. Следовательно, $m_x = m_0 \frac{l_2}{l_1}$.

Если длины плеч l_1, l_2 одинаковы, то $m_x = m_0$. Если же $l_1 \neq l_2$ (например, из-за технологического разброса длин плеч

при их изготовлении), то при взвешивании каждый раз возникает систематическая погрешность (14)

$$\theta = m_0 \left(\frac{l_2}{l_1} - 1 \right). \quad (14)$$

Для исключения этой погрешности взвешивание производится в два этапа. Сначала взвешивают груз m_x , уравновешивая весы гири массой m_{01} . При этом $m_x l_1 = m_{01} l_2$. Затем взвешиваемый груз перемещают на ту чашу весов, где прежде были гири и вновь уравновешивают весы гири массой m_{02} . Теперь получим $m_{02} l_1 = m_x l_2$. Исключив из равенств отношение l_1/l_2 , найдём $m_x = \sqrt{m_{01} m_{02}}$. Как видно из формулы, длины плеч не входят в окончательный результат взвешивания.

3. Метод компенсации погрешности по знаку (метод изменения знака систематической погрешности), предусматривающий измерение с двумя наблюдениями, выполняемыми так, чтобы постоянная систематическая погрешность входила в результат каждого из них с разными знаками. Исключается она при вычислении среднего значения (15)

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{(Q + \theta) + (Q - \theta)}{2}, \quad (15)$$

где \bar{X} – среднее арифметическое значение измеряемой величины; x_1, x_2 – результаты измерений; Q – действительное (истинное) значение измеряемой величины; θ – постоянная систематическая погрешность.

Например, характерным примером метода компенсации является исключение погрешности, обусловленной магнитным полем Земли. Первое измерение проводят, когда средство измерения находится в любом положении. Перед проведением второго измерения средство измерения поворачивают в горизонтальной плоскости на 180° . Если в первом случае магнитное поле Земли, складываясь с полем СИ, вызывало положи-

тельную погрешность, то при повороте на 180° магнитное поле Земли будет оказывать противоположное действие и вызовет отрицательную погрешность по размеру, равную первой.

4. Метод рандомизации – наиболее универсальный способ исключения неизвестных постоянных систематических погрешностей. Суть его состоит в том, что одна и та же величина измеряется различными методами (приборами). Систематические погрешности каждого из них для всей совокупности являются разными случайными величинами. Вследствие этого, при увеличении числа используемых методов (приборов) систематические погрешности взаимно компенсируются.

Для устранения переменных и монотонно изменяющихся систематических погрешностей применяют следующие приёмы и методы:

– анализ знаков неисправленных случайных погрешностей. Если знаки неисправленных случайных погрешностей чередуются с какой либо закономерностью, то наблюдается переменная систематическая погрешность. Если последовательность знаков «+» у случайных погрешностей сменяется последовательностью знаков «-», или наоборот, то присутствует монотонно изменяющаяся систематическая погрешность. Если группы знаков «+» и «-» у случайных погрешностей чередуются, то присутствует периодическая систематическая погрешность;

– графический метод – один из наиболее простых способов обнаружения переменной систематической погрешности в результатах наблюдений. Заключается он в графическом представлении последовательности неисправленных значений результатов наблюдений. На графике через построенные точки проводят плавную кривую, которая выражает тенденцию в изменении результата измерения, если она существует. Если тенденция не наблюдается, то переменную систематическую погрешность считают практически отсутствующей;

– метод симметричных наблюдений. Применяется для исключения прогрессирующего влияния какого-либо фактора, являющегося линейной функцией времени (например, по-

степенного прогрева аппаратуры, падения напряжения в цепи питания, вызванного разрядом аккумулятора и т. д.). Такая функция может быть изображена в виде графика, на котором по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат – прогрессивная погрешность. Способ симметричных наблюдений заключается в том, что в течение некоторого интервала времени выполняется несколько измерений одной и той же величины постоянного размера и за окончательный результат принимается полусумма отдельных результатов, симметричных по времени относительно середины интервала. Рекомендуется использовать данный способ, когда не очевидна возможность существования прогрессивной погрешности.

Кроме того, существуют ещё специальные статистические методы устранения систематических погрешностей результатов наблюдений:

- способ последовательных разностей – критерий Аббе применяется для обнаружения погрешности, изменяющейся во времени);

- дисперсионный анализ – критерий Фишера является наиболее эффективным и достоверным, поскольку позволяет не только установить факт наличия погрешности, но и проанализировать источники её возникновения;

- критерий Вилкоксона – применяется, если закон распределения результатов измерений неизвестен.

В ряде случаев систематические погрешности могут быть вычислены и исключены из результата измерения. Для этого используются поправки. Поправка C_j – значение величины, одноименной с измеряемой, которое вводится в результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности Θ_j . При $C_j = -\Theta_j$, j -я составляющая систематической погрешности полностью устраняется из результата измерения. Поправки определяются экспериментально или в результате специальных теоретических исследований и задаются в виде таблиц, графиков или формул. Введением одной поправки устраняется влияние только одной составляющей систематической погрешности. Для устранения всех состав-

ляющих в результат измерения приходится вводить множество поправок. При этом вследствие ограниченной точности определения поправок случайные погрешности результата измерения накапливаются и его дисперсия увеличивается.

4.4. Описание случайных погрешностей

Из теории вероятности известно, что наиболее универсальным способом описания случайных величин является отыскание их интегральных или дифференциальных функций распределения. Интегральной функцией распределения $F(x)$ называют функцию, каждое значение которой для каждого x является вероятностью события, заключающегося в том, что случайная величина x_i в i -м опыте принимает значение, меньшее x

$$F(x) = P\{x_i < x\} = P\{-\infty < x_i \leq x\}.$$

График интегральной функции распределения показан на рис. 18.

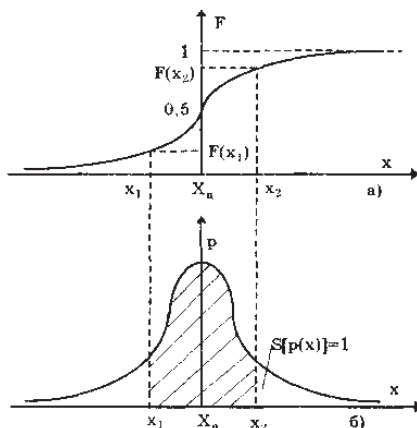


Рис. 18. Функции распределения случайной величины:
а – интегральная; б – дифференциальная

Она имеет следующие свойства:

– неотрицательная, т. е. $F(x) \geq 0$;

– неубывающая, т. е. $F(x_2) \geq F(x_1)$, если $x_2 \geq x_1$;

– диапазон её изменения простирается от 0 до 1, т. е.

$$F(-\infty) = F(+\infty) = 0 ;$$

– вероятность нахождения случайной величины x в диапазоне от x_1 до x_2 $P\{x_1 < x < x_2\} = F(x_2) - F(x_1)$.

Более наглядным является описание свойств результатов измерений и случайных погрешностей с помощью дифференциальной функции распределения, иначе называемой плотностью распределения вероятностей $p(x) = dF(x)/dx$. Она всегда неотрицательна и подчиняется условию нормирования в виде (16)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)dx = 1. \quad (16)$$

Учитывая взаимосвязь $F(x)$ и $p(x)$, легко показать, что вероятность попадания случайной величины в заданный интервал $(x_1; x_2)$ (17)

$$P\{x_1 < x < x_2\} = \int_{x_2}^{x_1} p(x)dx. \quad (17)$$

Следовательно, рассмотренное ранее условие нормирования означает, что вероятность попадания величины x в интервал $[-\infty; +\infty]$ равна единице, т. е. представляет собой достоверное событие.

Из последнего уравнения следует, что вероятность попадания случайной величины x в заданный интервал $(x_1; x_2)$ равна площади, заключённой под кривой $p(x)$ между абсциссами x_1 и x_2 (см. рис. 18). Поэтому по форме кривой плотности вероятности $p(x)$ можно судить о том, какие значения случайной величины x наиболее вероятны, а какие наименее.

Результирующая погрешность зачастую складывается из ряда составляющих с различными плотностями распределения $p_1(x), p_2(x), \dots, p_n(x)$. В связи с этим возникает задача определения суммарного закона распределения погрешности. Для

суммы независимых непрерывных случайных x_1 и x_2 , имеющих распределения $p_1(x)$ и $p_2(x)$, он называется композицией и выражается интегралами свёртки (18)

$$p(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(x_1)p_2(z - x_1) dx_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(z - x_2)p_2(x_2) dx_2. \quad (18)$$

Графическое определение композиции двух случайных независимых величин показано на рис. 19. Следует отметить, что масштаб всех графиков по вертикали произвольный, и должно выполняться условие: площадь, ограниченная кривой плотности вероятности, равна единице.

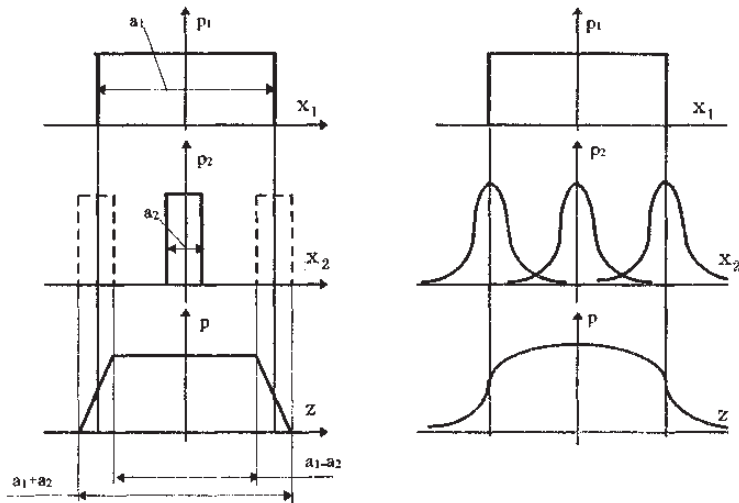


Рис. 19. Суммирование законов распределений

Присутствие случайных погрешностей в результатах измерений легко обнаруживается из-за их разброса относительно некоторого значения. Результат измерения, и его погрешность с известными оговорками могут рассматриваться как случайные величины.

Использование на практике вероятностного подхода к оценке погрешностей результатов измерений, прежде всего, предполагает знание аналитической модели закона распределения рассматриваемой погрешности. Встречающиеся в метрологии распределения достаточно разнообразны.

Функции распределения описывают поведение непрерывных случайных величин, т. е. величин, возможные значения которых неотделимы друг от друга и непрерывно заполняют некоторый конечный или бесконечный интервал. На практике все результаты измерений и случайные погрешности являются величинами дискретными, т. е. величинами X_j , возможные значения которых отделимы друг от друга и поддаются счёту. При использовании дискретных случайных величин возникает задача нахождения точечных оценок параметров их функций распределения на основании выборок – ряда значений x_{ii} принимаемых случайной величиной x в n независимых опытах. Используемая выборка должна быть репрезентативной (представительной), т. е. должна достаточно хорошо представлять пропорции генеральной совокупности.

Оценка параметра называется точечной, если она выражается одним числом. Задача нахождения точечных оценок – частный случай статистической задачи нахождения оценок параметров функции распределения случайной величины на основании выборки. В отличие от самих параметров, их точечные оценки являются случайными величинами, причём их значения зависят от объёма экспериментальных данных, а закон распределения – от законов распределения самих случайных величин.

Точечные оценки могут быть состоятельными, несмещёнными и эффективными. Состоятельной называется оценка, которая при увеличении объёма выборки стремится по вероятности к истинному значению числовой характеристики. Несмещённой называется оценка, математическое ожидание которой равно оцениваемой числовой характеристике. Наиболее эффективной считают ту из нескольких возможных несмещённых оценок, которая имеет наименьшую дисперсию. Тре-

бование несмещённости на практике не всегда целесообразно, так как оценка с небольшим смещением и малой дисперсией может оказаться предпочтительнее несмещённой оценки с большой дисперсией. На практике не всегда удается удовлетворить одновременно все три этих требования, однако выбору оценки должен предшествовать её критический анализ со всех перечисленных точек зрения.

Наиболее распространённым методом получения оценок является метод наибольшего правдоподобия, который приводит к асимптотически несмещённым и эффективным оценкам с приближённо нормальным распределением. Среди других методов можно назвать методы моментов и наименьших квадратов.

Точечной оценкой математического ожидания результата измерений является среднее арифметическое значение измеряемой величины (19)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (19)$$

При любом законе распределения оно является состоятельной и несмещённой оценкой, а также наиболее эффективной по критерию наименьших квадратов.

Точечная оценка дисперсии, определяемая по формуле (20)

$$\check{D}(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (20)$$

является несмещённой и состоятельной.

Среднее квадратическое отклонение случайной величины x определяется как корень квадратный из дисперсии. Соответственно его оценка может быть найдена путём извлечения корня из оценки дисперсии. Однако эта операция является нелинейной процедурой, приводящей к смещённости получаемой таким образом оценки. Для исправления оценки среднего квадратического отклонения вводят поправочный множитель

$k(n)$, зависящий от числа наблюдений n . Он изменяется от $k(3) = 1,13$ до $k(\infty) \approx 1,03$. Оценка среднего квадратического отклонения (21)

$$\bar{\sigma} = S_x = k(n) \sqrt{\bar{D}(x)} = k(n) \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (21)$$

Полученные оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения являются случайными величинами. Это проявляется в том, что при повторениях серий из n наблюдений каждый раз будут получаться различные оценки \bar{x} и σ . Рассеяние этих оценок целесообразно оценивать с помощью среднего квадратического отклонения $S_{\bar{x}}$ и S_{σ} . Оценка среднего квадратического отклонения среднего арифметического значения (22)

$$S_x = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (22)$$

Оценка среднего квадратического отклонения (23)

$$S_{\sigma} \approx \tilde{\sigma}(S_x) = S_x \frac{\sqrt{\varepsilon - 1}}{2\sqrt{n}}. \quad (23)$$

Отсюда следует, что относительная погрешность определения среднего квадратического отклонения может быть оценена как (23.1)

$$\frac{S_{\sigma}}{S_x} = \frac{\sqrt{\varepsilon - 1}}{2\sqrt{n}}. \quad (23.1)$$

Она зависит только от эксцесса и числа наблюдений в выборке и не зависит от среднего квадратического отклонения, т. е. той точности, с которой производятся измерения. Ввиду того, что большое число измерений проводится относительно

редко, погрешность определения σ может быть весьма существенной. В любом случае она больше погрешности из-за смещённости оценки, обусловленной извлечением квадратного корня и устранимой поправочным множителем $k(n)$. В связи с этим на практике пренебрегают учётом смещённости оценки среднего квадратического отклонения отдельных наблюдений и определяют его по формуле (24)

$$\bar{\sigma} = S_x = \sqrt{\tilde{D}[x]} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (24)$$

т. е. считают $k(n) = 1$.

Иногда оказывается удобнее использовать следующие формулы для расчёта оценок среднего квадратического отклонения отдельных наблюдений и результата измерения (25)

$$S_x = \sqrt{\frac{n}{n-1} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \right]}; \quad S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \right]}. \quad (25)$$

Точечные оценки других параметров распределений используются значительно реже. Оценки коэффициента асимметрии и эксцесса находятся по формулам (26)

$$\tilde{v} = \frac{1}{nS_x^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3; \quad \tilde{\varepsilon} = \frac{1}{nS_x^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4. \quad (26)$$

Определение рассеяния оценок коэффициента асимметрии и эксцесса описывается различными формулами в зависимости от вида распределения.

Точечные оценки параметров распределения дают оценку в виде числа, наиболее близкого к значению неизвестного параметра. Такие оценки используют только при большом числе измерений. Чем меньше объём выборки, тем легче допустить ошибку при выборе параметра. Для практики важно не только

получить точечную оценку, но и определить интервал, называемый доверительным, между границами которого с заданной доверительной вероятностью (27)

$$P\{X_n < x < x_b\} = 1 - q, \quad (27)$$

где q – уровень значимости; x_n, x_b – нижняя и верхняя границы интервала, находится истинное значение оцениваемого параметра.

В общем случае доверительные интервалы можно строить на основе неравенства Чебышева. При любом законе распределения случайной величины, обладающей моментами первых двух порядков, верхняя граница вероятности попадания отклонения случайной величины x от центра распределения $X_{ц}$ в интервал tS_x описывается неравенством Чебышева (28)

$$P\{|x - X_{ц}| \leq tS_x\} \leq 1 - 1/t^2, \quad (28)$$

где S_x – оценка среднего квадратического отклонения распределения; t – положительное число.

Для нахождения доверительного интервала не требуется знать закон распределения результатов наблюдений, но нужно знать оценку среднего квадратического отклонения. Полученные с помощью неравенства Чебышева интервалы оказываются слишком широкими для практики. Так, доверительной вероятности 0,9 для многих законов распределений соответствует доверительный интервал $1,6 S_x$. Неравенство Чебышева даёт в данном случае $3,16 S_x$. В связи с этим оно не получило широкого распространения.

В метрологической практике используют главным образом квантильные оценки доверительного интервала. Под 100 % квантилем x_p понимают абсциссу такой вертикальной линии, слева от которой площадь под кривой плотности распределения равна P %. Иначе говоря, квантиль – это значение случайной величины (погрешности) с заданной доверительной вероятностью P . Например, медиана распределения является 50 % квантилем $x_{0,5}$.

На практике 25–75 % квантили принято называть сгибами, или квантилями распределения. Между ними заключено 50 % всех возможных значений случайной величины, а остальные 50 % лежат вне их. Интервал значений случайной величины x между $x_{0,05}$ и $x_{0,95}$ охватывает 90 % всех её возможных значений и называется интерквантильным промежутком с 90 % вероятностью. Его протяженность равна $d_{0,9} = x_{0,95} - x_{0,05}$.

На основании такого подхода вводится понятие квантильных значений погрешности, т. е. значений погрешности с заданной доверительной вероятностью P – границ интервала неопределённости $\pm \Delta_d = \pm (x_p - x_{1-p})/2 = \pm d_p/2$. На его протяжённости встречается P % значений случайной величины (погрешности), а $q = (1 - P)$ % общего их числа остаются за пределами этого интервала.

Для получения интервальной оценки нормально распределенной случайной величины необходимо:

- определить точечную оценку математического ожидания \bar{x} и среднего квадратического отклонения S_x случайной величины;
- выбрать доверительную вероятность P из рекомендуемого ряда значений 0,90; 0,95; 0,99;
- найти верхнюю x_v и нижнюю x_n границы в соответствии с уравнениями

$$F(x_n) = q/2 = 1 - P/2 \text{ и } F(x_v) = 1 - q/2 = 1 + P/2.$$

Значения x_n и x_v определяются из таблиц значений интегральной функции распределения $F(t)$ или функции Лапласа $\Phi(1)$ представленных в прил. А, В.

Полученный доверительный интервал удовлетворяет условию (29)

$$P\{\bar{x} - z_p S_x / \sqrt{n} < x < \bar{x} + z_p S_x / \sqrt{n}\} = 2F(z_p), \quad (29)$$

где n – число измеренных значений; z_p – аргумент функции Лапласа $\Phi(1)$, отвечающей вероятности $P/2$. В данном случае

z_p называется квантильным множителем. Половина длины доверительного интервала $D_p = z_p S_x / \sqrt{n}$ называется доверительной границей погрешности результата измерений.

Например, произведено 50 измерений постоянного сопротивления. Определить доверительный интервал для математического ожидания значения постоянного сопротивления, если закон распределения нормальный с параметрами $m_x = R = 590$ Ом, $S_x = 90$ Ом при доверительной вероятности $P = 0,9$.

Так как гипотеза о нормальности закона распределения не противоречит опытным данным, доверительный интервал определяется по формуле (30)

$$P\{\bar{x} - z_p/S_x\sqrt{n} < x < \bar{x} + z_p/S_x\sqrt{n}\} = 2\Phi(z_p). \quad (30)$$

Отсюда $\Phi(z_p) = 0,45$. Из таблицы, приведённой в прил. А, находим, что $z_p = 1,65$. Следовательно, доверительный интервал запишется в виде

$$590 - 1,65 \cdot 90 / \sqrt{50} < R < 590 + 1,65 \cdot 90 / \sqrt{50}$$

или $590 - 21 < R < 590 + 21$. Окончательно $509 \text{ Ом} < R < 611 \text{ Ом}$.

При отличии закона распределения случайной величины от нормального необходимо построить его математическую модель и определять доверительный интервал с её использованием.

Рассмотренный способ нахождения доверительных интервалов справедлив для достаточно большого числа наблюдений n , когда $\sigma = S_x$. Следует помнить, что вычисляемая оценка среднего квадратического отклонения S_x является лишь некоторым приближением к истинному значению σ . Определение доверительного интервала при заданной вероятности оказывается тем менее надёжным, чем меньше число наблюдений. Нельзя пользоваться формулами нормального распределения при малом числе наблюдений, если нет возможности теорети-

чески на основе предварительных опытов с достаточно большим числом наблюдений определить среднее квадратическое отклонение.

Расчёт доверительных интервалов для случая, когда распределение результатов наблюдений нормально, но их дисперсия неизвестна, т. е. при малом числе наблюдений n , возможно выполнить с использованием распределения Стьюдента $S(t, k)$. Оно описывает плотность распределения отношения (дробь Стьюдента) (31)

$$t = \frac{\bar{x} - M[x]}{S_{\bar{x}}} = \frac{\bar{x} - Q}{S_{\bar{x}}} \sqrt{n} \frac{\bar{x} - Q}{S_x}, \quad (31)$$

где Q – истинное значение измеряемой величины. Величины \bar{x} , S_x и $S_{\bar{x}}$ вычисляются на основании опытных данных и представляют собой точечные оценки МО, СКО результатов измерений и СКО среднего арифметического значения.

Вероятность того, что дробь Стьюдента в результате выполненных наблюдений примет некоторое значение в интервале $(-t_p; +t_p)$ (32)

$$\begin{aligned} P\left\{-t_p < \frac{\bar{x} - Q}{S_{\bar{x}}} < +t_p\right\} &= \{|\bar{x} - Q| < \frac{t_p - S_x}{\sqrt{n}}\} = \\ &= \int_{-t_p}^{+t_p} S(t, k) dt = 2 \int_0^{t_p} S(t, k) dt, \end{aligned} \quad (32)$$

где k – число степеней свободы, равное $(n - 1)$. Величины t_p (называемые в данном случае коэффициентами Стьюдента), рассчитанные с помощью двух последних формул для различных значений доверительной вероятности и числа измерений, табулированы (см. прил. Б). Следовательно, с помощью распределения Стьюдента можно найти вероятность того, что отклонение среднего арифметического от истинного значения измеряемой величины не превышает (33)

$$\Delta_p = t_p S_{\bar{x}} = t_p S_x / \sqrt{n}. \quad (33)$$

В тех случаях, когда распределение случайных погрешностей не является нормальным, всё же часто пользуются распределением Стьюдента с приближением, степень которого остается неизвестной. Распределение Стьюдента применяют при числе измерений $n < 30$, поскольку уже при $n = 20, \dots, 30$ оно переходит в нормальное. Результат измерения записывается в виде: $Q = \bar{x} \pm t S_x / \sqrt{n}$; $P = P_d$, где P_d – конкретное значение доверительной вероятности. Множитель t при большом числе измерений n равен квантильному множителю z_p . При малом n он равен коэффициенту Стьюдента.

Полученный результат измерения не является одним конкретным числом, а представляет собой интервал, внутри которого с некоторой вероятностью P_d находится истинное значение измеряемой величины. Выделение середины интервала x вовсе не предполагает, что истинное значение ближе к нему, чем к остальным точкам интервала. Оно может быть в любом месте интервала, а с вероятностью $1 - P_d$ (даже вне его).

4.5. Грубые погрешности и методы их исключения

Грубая погрешность, или промах – это погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Источником грубых погрешностей нередко бывают резкие изменения условий измерения и ошибки, допущенные оператором. К ним можно отнести:

- неправильный отсчёт по шкале измерительного прибора, происходящий из-за неверного учёта цены малых делений шкалы;
- неправильная запись результата наблюдений, значений отдельных мер использованного набора, например, гирь;
- хаотические изменения параметров питающего СИ напряжения, например его амплитуды или частоты.

Грубые погрешности, как правило, возникают при однократных измерениях и обычно устраняются путём повторных

измерений. Их причинами могут быть внезапные и кратковременные изменения условий измерения или оставшиеся незамеченными неисправности в аппаратуре.

При однократных измерениях обнаружить промах не представляется возможным. Для уменьшения вероятности появления промахов измерения проводят два-три раза и за результат принимают среднее арифметическое полученных отсчётов. При многократных измерениях для обнаружения промахов используют статистические критерии, предварительно определив, какому виду распределения соответствует результат измерений.

Вопрос о том, содержит ли результат наблюдений грубую погрешность, решается общими методами проверки статистических гипотез. Проверяемая гипотеза состоит в утверждении, что результат наблюдения x не содержит грубой погрешности, т. е. является одним из значений измеряемой величины. Пользуясь определёнными статистическими критериями, пытаются опровергнуть выдвинутую гипотезу. Если это удастся, то результат наблюдений рассматривают как содержащий грубую погрешность и его исключают.

Для выявления грубых погрешностей задаются вероятностью q (уровнем значимости) того, что сомнительный результат действительно мог иметь место в данной совокупности результатов измерений.

Критерий «трёх сигм» применяется для результатов измерений, распределённых по нормальному закону. По этому критерию считается, что результат, возникающий с вероятностью $q < 0,003$, маловероятен и его можно считать промахом, если $|\bar{x} - x_i| > 3S_x$, где S_x – оценка среднего квадратического отклонения измерений. Величины \bar{x} и S_x вычисляют без учёта экстремальных значений x_i . Данный критерий надёжен при числе измерений $n > 20...50$.

Это правило обычно считается слишком жёстким, поэтому рекомендуется [21] назначать границу цензурирования в зависимости от объёма выборки: при

$6 < n < 100$ она равна $4S_x$; при $100 < n < 1000$ – $4,5S_x$; при $1000 < n < 10000$ – $5S_x$. Данное правило также применимо только для нормального закона.

В общем случае границы цензурирования $t_{гр} S_x$ выборки зависят не только от объёма n , но и от вида распределения. Назначая ту или иную границу, необходимо оценить уровень значимости q , т. е. вероятность исключения какой-либо части отсчётов, принадлежащих обрабатываемой выборке. В [21] приводится выражение для приближенного расчёта коэффициента $t_{гр}$ при уровне значимости $q < 1/(n + 1)$:

$$t_{гр} = 1,55 + 0,8\sqrt{\varepsilon - 1} \lg(n/10),$$

где ε – эксцесс распределения. Данные выражения применимы для:

- кругловершинных двухмодальных распределений с $\varepsilon = 1, 5, \dots, 3$, являющихся композицией дискретного двузначного и нормального распределений;
- островершинных двухмодальных распределений с $\varepsilon = 1, 5, \dots, 6$, являющихся композицией дискретного двузначного распределения и распределения Лапласа;
- композиций равномерного и экспоненциальных распределений с показателем степени $\alpha = 1/2$ при $\varepsilon = 1, 8, \dots, 6$;
- экспоненциальных распределений с $\varepsilon = 1, 5, \dots, 6$.

Критерий Романовского применяется, если число измерений $n < 20$. При этом вычисляется отношение $|(\bar{x} - x_i)/Sx| = \beta$ и сравнивается с критерием β_p , выбранным по табл. 10. Если $\beta > \beta_p$, то результат x_i считается промахом и отбрасывается [28].

Таблица 10

Значения критерия Романовского

q	$n = 4$	$n = 6$	$n = 8$	$n = 10$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 20$
0,01	1,73	2,16	2,43	2,62	22,75	2,90	3,08
0,02	1,72	2,13	2,37	2,54	2,66	2,80	2,96
0,05	1,71	2,10	2,27	2,41	2,52	2,64	2,78
0,10	1,69	2,00	2,17	2,29	2,39	2,49	2,62

Критерий Шарлье используется, если число наблюдений в ряду велико ($n > 20$). Тогда по теореме Бернулли число результатов, превышающих по абсолютному значению среднее арифметическое значение на величину $K_{ш} S_x$ будет $n[1 - \Phi(K_{ш})]$, где $\Phi(K_{ш})$ – значение нормированной функции Лапласа для $X = K_{ш}$. Если сомнительным в ряду результатов наблюдений является один результат, то $n[1 - \Phi(K_{ш})] = 1$. Отсюда $\Phi(K_{ш}) = \frac{(n-1)}{n}$.

Значения критерия Шарлье приведены в табл. 11.

Таблица 11

Значения критерия Шарлье

<i>n</i>	5	10	20	30	40	50	100
<i>Kш</i>	1,3	1,65	1,96	2,13	2,24	2,32	2,58

Пользуясь критерием Шарлье, отбрасывают результат, для значения которого в ряду из n наблюдений выполняется неравенство

Вариационный критерий Диксона удобный и достаточно мощный (с малыми вероятностями ошибок). При его применении полученные результаты наблюдений записывают в вариационный возрастающий ряд x_1, x_2, \dots, x_n ($x_1 < x_2 < \dots < x_n$). Критерий Диксона определяется как $K_D = \frac{x_n - x_{n-1}}{(x_n - x_1)}$. Крити-

ческая область для этого критерия $P(K_D > Z_q) = q$. Значения Z_q приведены в табл. 12.

Таблица 12

Значения критерия Диксона

<i>n</i>	<i>Z_q при q, равном</i>			
	<i>0,10</i>	<i>0,05</i>	<i>0,02</i>	<i>0,01</i>
4	0,68	0,76	0,85	0,89
6	0,48	0,56	0,64	0,70
8	0,40	0,47	0,54	0,59
10	0,35	0,41	0,48	0,53
14	0,29	0,35	0,41	0,45

16	0,28	0,33	0,39	0,43
18	0,26	0,31	0,37	0,41
20	0,26	0,30	0,36	0,39
30	0,22	0,26	0,31	0,34

Применение рассмотренных критериев требует осмозрительности и учёта объективных условий измерений. В сомнительных случаях лучше сделать дополнительные измерения (не взамен сомнительных, а кроме них) и затем привлекать на помощь рассмотренные ранее статистические критерии. Кроме рассмотренных критериев, существуют и другие, например критерии Граббса и Шовенэ.

4.6. Концепция неопределённости измерения

4.6.1. Понятие неопределённости измерения

Неопределённость измерения – это общее понятие, связанное с любым измерением, используемым при необходимости принятия обоснованных решений в разных областях практической деятельности и теоретических исследований. По мере наблюдаемого ужесточения допусков в технологических процессах роль неопределённости измерений при оценке соответствия этим допускам все более возрастает. Центральную роль неопределённость измерения играет также при оценке качества и в стандартах качества.

Появление критерия неопределённости измерений связано с практической нереализуемостью понятия погрешности измерения как разности между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины, т. к. истинное значение величины – это философская абсолютная истина, значение которой неизвестно. Вместо истинного значения принимают действительное значение с некоторой минимальной погрешностью, но опять же отсчитываемой от неизвестного истинного.

Понятие неопределённости как количественной характеристики является относительно новым в истории измерений, хотя понятия погрешности и анализа погрешностей давно используются в метрологической практике. В настоящее время общепризнанно, что после того, как найдены оценки всех ожидаемых составляющих погрешности и в результате измерения внесены соответствующие поправки, все ещё остается некоторая неопределённость в отношении полученного результата, т. е. сомнение в том, насколько точно он соответствует значению измеряемой величины. Данные о неопределённости измерения должны всегда приниматься во внимание при оценке соответствия результата измерения его целям.

Согласно ГОСТ Р 54500.3 – 2011 неопределённость измерения – параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине [5].

Данное определение неопределённости измерения является рабочим, привязанным, в первую очередь, к понятиям результата измерения и оценки его неопределённости. Однако оно не противоречит использованию понятия неопределённости измерений в других смыслах, таких как:

- мера возможной погрешности оценки измеряемой величины, полученной как результат измерения;
- оценка, характеризующая диапазон значений, в пределах которого находится истинное значение измеряемой величины (VIM:1984, 3.09).

Хотя оба эти традиционно используемые представления справедливы как идеализация, основной акцент в них сделан на неизвестные величины: «погрешность результата измерения» и «истинное значение измеряемой величины», в противоположность известной оценке этой величины, соответственно. Тем не менее, независимо от того, какой смысл вкладывают в понятие неопределённости измерения, для оценивания её составляющей всегда используют одни и те же данные и имеющуюся информацию.

Неопределённость измерения, как правило, включает в себя много составляющих. Некоторые из них могут быть

оценены из статистического распределения результатов ряда измерений и описаны выборочными стандартными отклонениями. Другие составляющие, которые также могут быть описаны стандартными отклонениями, оценивают, исходя из основанных на опыте предположений или иной информации о виде закона распределения.

Количественными выражениями неопределённости результата измерений являются:

Стандартная неопределённость (u) – неопределённость результата измерения, выраженная в виде стандартного отклонения.

Суммарная стандартная неопределённость (u_c) – стандартная неопределённость результата измерения, полученного из значений ряда других величин, равная положительному квадратному корню взвешенной суммы дисперсий или ковариаций этих величин, весовые коэффициенты при которых определяются зависимостью изменения результата измерения от изменений этих величин.

Расширенная неопределённость (U) – величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, который, как ожидается, содержит в себе большую часть распределения значений, что с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине.

Различают два типа вычисления стандартной неопределённости:

– по типу А – метод оценивания неопределённости путём статистического анализа ряда наблюдений;

– по типу В – метод оценивания неопределённости, отличный от статистического анализа ряда наблюдений.

4.6.2. Оценка стандартной неопределённости типа А

В большинстве случаев наилучшей оценкой математического ожидания μ_q случайным образом изменяющейся величины, для которой при постоянных условиях измерения были

получены n независимых наблюдений q_k , является среднее арифметическое значение \bar{q} из n наблюдений (34)

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k. \quad (34)$$

Поэтому для получения результата измерения y по формуле $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ в качестве оценки x_i входной величины X_i по результатам n независимых повторных наблюдений X_{ik} используют среднее арифметическое значение $x_i = \bar{X}_i$, вычисленное в соответствии с формулой (3).

Разброс значений в наблюдениях q_k обусловлен случайными изменениями влияющих величин. Выборочную дисперсию $S^2(q_k)$, являющуюся оценкой дисперсии σ^2 для данного распределения вероятностей величины q , получают по формуле (35)

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2. \quad (35)$$

Положительный квадратный корень $S^2(q_k)$ из выборочной дисперсии называют выборочным стандартным отклонением. Эта величина характеризует изменчивость наблюдений q_k или, точнее, их разброс относительно среднего значения \bar{q} .

Наилучшей оценкой дисперсии среднего значения $\sigma^2(\bar{q})$, $\sigma^2(\bar{q}) = \frac{\sigma^2}{n}$, является $s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n}$.

Выборочная дисперсия среднего значения $S^2(\bar{q})$ и выборочное стандартное отклонение среднего значения $S(\bar{q})$ равное положительному квадратному корню из $S^2(\bar{q})$ определяют количественно, насколько хорошей оценкой математического ожидания μ_k величины q является (\bar{q}) , и могут быть использованы в качестве меры неопределённости (\bar{q}) .

Таким образом, стандартную неопределённость $u(x_i)$ оценки $x_i = \bar{X}_i$, полученную по n независимым повторным наблюдениям X_{ik} входной величины X_i , определяют как

$u(x_i) = s(\bar{X}_I)$. Для удобства $u^2(x_i) = s^2(\bar{X}_I)$ и $u(x_i) = s(\bar{X}_I)$ иногда называют, соответственно, дисперсией типа А и стандартной неопределённостью типа А.

4.6.3. Оценивание стандартной неопределённости типа В

Для оценки x_i входной величины X_i , которая не была определена в результате повторных наблюдений, значения оценки дисперсии $u^2(x_i)$ или стандартной неопределённости $u(x_i)$ получают в результате обобщения и анализа всей доступной информации о возможной вариативности X_i . Такая информация включает в себя:

- данные предшествующих измерений;
- полученные опытным или теоретическим путём сведения о свойствах материалов и характеристиках приборов;
- характеристики, заявляемые изготовителем;
- данные, приводимые в свидетельствах о калибровке и других документах;
- неопределённости величин, которые вместе со значениями этих величин приведены в справочниках.

Для удобства оценки $u^2(x_i)$ и $u(x_i)$, полученные таким образом, называют, соответственно, дисперсией типа В и стандартной неопределённостью типа В.

Правильное использование доступной информации для оценивания стандартной неопределённости типа В требует физической интуиции, основанной на опыте и общих знаниях, которая приходит с накопленной практикой. Следует понимать, что оценка стандартной неопределённости по типу В может быть не менее надёжной, чем оценка стандартной неопределённости по типу А, особенно, если последняя получена в условиях небольшого числа статистически независимых наблюдений.

Если оценка x_i взята из документального источника, в котором значение неопределённости x_i дано в виде стандартного отклонения, умноженного на некоторый коэффициент, то

стандартную неопределённость $u(x_i)$ можно получить, разделив справочное значение неопределённости на этот коэффициент, а оценку дисперсии $u^2(x_i)$ – возведя полученный результат в квадрат.

Приводимая в том или ином источнике информация о неопределённости x_i не всегда имеет вид величины, кратной стандартному отклонению. Часто такая неопределённость определяется в виде интервала с уровнем доверия 90, 95 или 99 %. Если не указано иное, то можно предположить, что для расчёта указанного интервала используется гипотеза о нормальном распределении величины x_i . В этом случае стандартную неопределённость для x_i получают делением приведенного в источнике информации значения на соответствующий коэффициент для нормального распределения. Так трём уровням доверия, указанным ранее, соответствуют следующие коэффициенты: 1,64; 1,96 и 2,58.

Важно, чтобы одни и те же составляющие неопределённости не были учтены более одного раза. Если составляющая неопределённости, обусловленная конкретным эффектом, получена оценением типа В, то она должна войти как независимая составляющая при расчёте суммарной стандартной неопределённости только в той части, в какой этот эффект не вызывает вариативности результатов измерения. Это обусловлено тем, что та часть эффекта, которая вносит вклад в вариативность, уже включена в составляющую неопределённости, полученную на основе статистического анализа наблюдений.

4.6.4. Определение суммарной стандартной неопределённости

Суммарная неопределённость является комбинацией всех измерений, при этом результаты измерения могут быть независимыми или коррелировать друг с другом.

Для независимых измерений, суммарная стандартная неопределённость $u_c(y)$ представляет собой положительный квадратный корень из суммарной дисперсии $u_c^2(y)$, получаемой по формуле (36)

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (36)$$

где f – функция (модель) измерения, $u(x_i)$ – стандартная неопределённость входной величины, оцененная по типу А или В.

Суммарная стандартная неопределённость $u_c(y)$ представляет собой оценку стандартного отклонения измеряемой величины и характеризует разброс значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны этой величине.

В случае, если нелинейность функции f критична, ряд Тейлора для производной $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ должен включать старшие степени (36.1)

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i) u^2(x_j). \quad (36.1)$$

Частные производные $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, называемые коэффициентами чувствительности, следует понимать как $\frac{\partial f}{\partial x_i}$, при $X_i = x_i$. Они показывают, как изменяется выходная оценка y с изменением входных оценок x_1, x_2, \dots, x_N . Так, при небольшом изменении входной оценки x_i на величину Δx_i оценка y изменится на $(\Delta y)_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$. Если изменение входной оценки x_i совпадает с её стандартной неопределённостью, то соответствующее изменение в y будет равно $\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i)$. Поэтому суммарную дисперсию $u_c^2(y)$ можно рассматривать как сумму дисперсий выходной оценки y , каждая из которых обусловлена дисперсией соответствующей входной оценки x_i , т. е. (37)

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2(y), \quad (37)$$

где $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$; $u_i(y) = |c_i| u(x_i)$.

Суммарную стандартную неопределённость можно вычислить, заменив на следующее выражение (38)

$$Z_i = \frac{1}{2} \{f[x_1 \dots x_i + u(x_i) \dots x_N] - f[x_1 \dots x_i - u(x_i) \dots x_N]\}. \quad (38)$$

Таким образом, численную оценку $u_i(y)$ можно получить, вычисляя изменения y при изменениях x_i на $+u_i(x_i)$ и $-u_i(x_i)$ принимая $u_i(y)$ равным $|Z_i|$. При этом соответствующий коэффициент чувствительности c_i может быть представлен как $\frac{Z_i}{u(x_i)}$.

В некоторых случаях коэффициенты чувствительности $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ определяют не расчётным способом из вида функциональной зависимости f , а экспериментально, измеряя изменение Y , вызванное изменением заданной входной величины X_i , когда значения остальных входных величин поддерживаются постоянными. В этом случае не требуется знания вида функциональной зависимости f . Вместо этого достаточно получить разложение f в ряд Тейлора первого порядка через эмпирические коэффициенты чувствительности.

В случае, когда величины x_i имеют корреляционную зависимость, формула для суммарной дисперсии $u_c^2(y)$ результата измерения будет иметь следующий вид (39)

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u_i(x_i, x_j) = \\ &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_i(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u_i(x_i, x_j), \end{aligned} \quad (39)$$

где x_i и x_j – оценки, соответственно X_i и X_j , а $u_i(x_i, x_j) = u_i(x_i, x_j)$ – оценка ковариации x_i, x_j . Степень корреляции между x_i и x_j характеризуется оценкой коэффициента корреляции (40)

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}, \quad (40)$$

где $r(x_i, x_j) = r(x_i, x_j)$ и $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$.

Если оценки x_i и x_j независимы, то $r(x_i, x_j) = 0$, и по изменению значения одной из этих случайных величин нельзя прогнозировать изменение значения другой.

В случае, когда все входные величины коррелированы с коэффициентами корреляции $r(x_i, x_j) = 1$, суммарная дисперсия $u_c^2(y)$ определяется следующим образом (41)

$$u_c^2(y) = \left(\sum_{i=1}^N c_i u(x_i) \right)^2 = \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2. \quad (41)$$

При этом суммарная стандартная неопределённость будет представлять собой просто сумму составляющих неопределённости выходной величины, каждое из которых обусловлено неопределённостью соответствующей входной оценки.

4.6.5. Определение расширенной неопределённости

Расширенная неопределённость (U) определяется умножением суммарной стандартной неопределённости $u_c(y)$ на коэффициент охвата k (42)

$$U = k u_c(y). \quad (42)$$

При этом результат измерения удобно выражать в виде $Y = y \pm U$, означая, что лучшей оценкой значения, приписываемого измеряемой величине Y , является y , и что интервал от $y - U$ до $y + U$ содержит большую часть распределения значений, которые можно с достаточным основанием приписать Y .

Значение коэффициента охвата k выбирается на основе уровня доверия, требуемого для интервала от $y - U$ до $y + U$. Обычно k принимает значения от 2 до 3, однако в особых случаях значение коэффициента охвата может находиться вне этих границ. Обоснованный выбор значения требует большого опыта и чёткого понимания, в каких целях будет использован результат измерения.

4.7. Обработка результатов прямых многократных измерений

4.7.1. Равноточные измерения

Прямые многократные измерения делятся на равно- и неравноточные.

Равноточными называются измерения, которые проводятся средствами измерений одинаковой точности по одной и той же методике при неизменных внешних условиях. При равноточных измерениях средние квадратические отклонения результатов всех рядов измерений равны между собой.

Перед проведением обработки результатов измерений необходимо удостовериться в том, что данные из обрабатываемой выборки статистически подконтрольны, группируются вокруг одного и того же центра и имеют одинаковую дисперсию. Устойчивость изменений часто оценивают интуитивно на основе длительных наблюдений. Однако существуют математические методы решения поставленной задачи – так называемые методы проверки однородности [22]. Применительно к измерениям рассматривается однородность групп наблюдений, необходимые признаки которой состоят в оценке несмещённости средних арифметических и дисперсий относительно друг друга.

Проверка допустимости различия между оценками дисперсий нормально распределённых результатов измерений

выполняется с помощью критерия Р. Фишера при наличии двух групп наблюдений и критерия М. Бартлетта, если групп больше.

Задача обработки результатов многократных измерений заключается в нахождении оценки измеряемой величины и доверительного интервала, в котором находится её истинное значение.

Исходной информацией для обработки является ряд из $n(n > 4)$ результатов измерений $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, из которых исключены известные систематические погрешности, – выборка. Число n зависит как от требований к точности получаемого результата, так и от реальной возможности выполнять повторные измерения.

Последовательность обработки результатов прямых многократных измерений состоит из ряда этапов.

1. Определение точечных оценок закона распределения результатов измерений.

На этом этапе определяются:

– среднее арифметическое значение x измеряемой величины;

– среднее квадратическое отклонение результата измерения S_x ;

– среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения $S_{\bar{x}}$ по формуле. В соответствии с установленными критериями, грубые погрешности и промахи исключаются, после чего проводится повторный расчёт оценок среднего арифметического значения и его среднего квадратического отклонения. В ряде случаев для более надёжной идентификации закона распределения результатов измерений могут определяться другие точечные оценки: коэффициент асимметрии, эксцесс и контрэксцесс, энтропийный коэффициент.

2. Определение закона распределения результатов измерений или случайных погрешностей измерений.

В последнем случае от выборки результатов измерений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ переходят к выборке отклонений от среднего арифметического $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n$, где $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$.

Первым шагом при идентификации закона распределения является построение по исправленным результатам измерений x_i , где $i = 1, 2, \dots, n$, вариационного ряда (упорядоченной выборки), а также y_i , где $y_1 = \min(x_i)$ и $y_n = \max(x_i)$. В вариационном ряду результаты измерений (или их отклонения от среднего арифметического) располагают в порядке возрастания. Далее этот ряд разбивается на оптимальное число m , как правило, одинаковых интервалов группирования длиной $h = (y_1 + y_n) / m$.

Оптимальным является такое число интервалов m , при котором возможное максимальное сглаживание случайных флуктуации данных сопровождается с минимальным искажением от сглаживания самой кривой искомого распределения. Для практического применения целесообразно использовать выражения $m_{\min} = 0,55 n^{0,4}$ и $m_{\max} = 1,25 n^{0,4}$, которые получены для наиболее часто встречающихся на практике распределений с эксцессом, находящимся в пределах от 1,8 до 6, т. е. от равномерного до распределения Лапласа.

Искомое значение m должно находиться в пределах от m_{\min} до m_{\max} , быть нечётным, т. к. при чётном m в островершинном или двухмодальном симметричном распределении в центре гистограммы оказываются два равных по высоте столбца и середина кривой распределения искусственно уплощается. В случае, если гистограмма распределения явно двухмодальная, число столбцов может быть увеличено в 1,5–2 раза, чтобы на каждый из двух максимумов приходилось примерно по m интервалов. Полученное значение длины интервала группирования h всегда округляют в большую сторону, иначе последняя точка окажется за пределами крайнего интервала.

Далее определяют интервалы группирования экспериментальных данных в виде $\Delta_1 = (y_1, y_1 + h)$; $\Delta_2 = (y_1 + h, y_1 + 2h)$... $\Delta_m = (y_n - h, y_n)$ и подсчитывают число попаданий n_k (частоты) результатов измерений в каждый интервал группирова-

ния. Сумма этих чисел должна равняться числу измерений. По полученным значениям рассчитывают вероятности попадания результатов измерений (частоты) в каждый из интервалов группирования по формуле $p_k = n_k/n$, где $k = 1, 2, \dots, m$.

Проведенные расчёты позволяют построить гистограмму, полигон и кумулятивную кривую. Для построения гистограммы по оси результатов наблюдений x (см. рис. 20а) откладываются интервалы Δ_k в порядке возрастания номеров и на каждом интервале строится прямоугольник высотой p_k . Площадь, заключённая под графиком, пропорциональна числу наблюдений n . Иногда высоту прямоугольника откладывают разной эмпирической плотности вероятности $p_k = P_k / \Delta_k = n_k / (n \Delta_k)$, которая является оценкой средней плотности в интервале Δ_k . В этом случае площадь под гистограммой равна единице. При увеличении числа интервалов и соответственно уменьшении их длины гистограмма все более приближается к гладкой кривой – графику плотности распределения вероятности. Следует отметить, что в ряде случаев производят расчётное симметрирование гистограммы.

Полигон представляет собой ломаную кривую, соединяющую середины верхних оснований каждого столбца гистограммы (см. рис. 20а). Он более наглядно, чем гистограмма, отражает форму кривой распределения. За пределами гистограммы справа и слева остаются пустые интервалы, в которых точки, соответствующие их серединам, лежат на оси абсцисс.

Эти точки при построении полигона соединяют между собой отрезками прямых линий. В результате совместно с осью x образуется замкнутая фигура, площадь которой в соответствии с правилом нормирования должна быть равна единице (или числу наблюдений при использовании частостей).

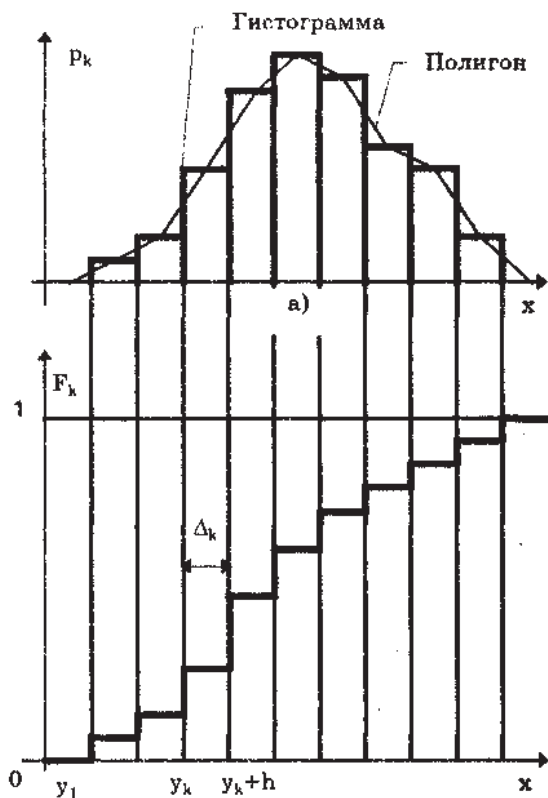


Рис. 20. Гистограмма:
а – полигон; б – кумулятивная кривая

Кумулятивная кривая – это график статистической функции распределения. Для её построения по оси результатов наблюдений x (см. рис. 20) откладывают интервалы Δ_k в порядке возрастания номеров и на каждом интервале строят прямоугольник высотой (43)

$$F_k = \sum_{k=0}^k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^k n_k. \quad (43)$$

Значение F_k называется кумулятивной частотой, а сумма n_k – кумулятивной частотой.

По виду построенных зависимостей может быть оценен закон распределения результатов измерений.

1. Оценка закона распределения по статистическим критериям.

При числе наблюдений $n > 50$ для идентификации закона распределения используется критерий Пирсона или критерий Мизеса – Смирнова (ω_2). При $50 > n > 15$ для проверки нормальности закона распределения применяется составной критерий (d-критерий). При $n < 15$ принадлежность экспериментального распределения к нормальному не проверяется.

2. Определение доверительных границ случайной погрешности.

Если удалось идентифицировать закон распределения результатов измерений, то с его использованием находят квантильный множитель z_p при заданном значении доверительной вероятности P . В этом случае доверительные границы случайной погрешности $A = \pm z_p S_{\bar{x}}$.

3. Определение границ неисключенной систематической погрешности θ результата измерений.

Под этими границами понимают найденные нестатистическими методами границы интервала, внутри которого находится неисключенная систематическая погрешность. Она образуется из ряда составляющих: как правило, погрешностей метода и средств измерений, а также субъективной погрешности. Границы неисключенной систематической погрешности принимаются равными пределам допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, если их случайные составляющие пренебрежимо малы. Они суммируются. Доверительная вероятность при определении границ принимается равной доверительной вероятности, используемой при нахождении границ случайной погрешности.

4. Определение доверительных границ погрешности результата измерения Δ_p .

Данная операция осуществляется путём суммирования СКО случайной составляющей S_x и границ неисключенной систематической составляющей θ в зависимости от соотношения θ/S_x .

5. Запись результата измерения.

Результат измерения записывается в виде $x = x_i \pm \Delta_p$ при доверительной вероятности $P = P$. При отсутствии данных о виде функции распределения составляющих погрешности результаты измерений представляют в виде \bar{x} , $S_{\bar{x}}$, при доверительной вероятности $P = P_d$.

4.7.2. Однократные измерения

Прямые многократные измерения, как правило, относятся к лабораторным измерениям. Для производственных процессов более характерны однократные измерения. Они являются самыми массовыми и проводятся, если: при измерении происходит разрушение объекта измерения, отсутствует возможность повторных измерений, имеет место экономическая целесообразность. Эти измерения возможны лишь при определённых условиях:

- объём априорной информации об объекте измерений таков, что модель объекта и определение измеряемой величины не вызывают сомнений;

- изучен метод измерения, его погрешности либо заранее устранены, либо оценены;

- средства измерений исправны, а их метрологические характеристики соответствуют установленным нормам.

За результат прямого однократного измерения принимается полученная величина. До измерения должна быть проведена априорная оценка составляющих погрешности с использованием всех доступных данных. При определении доверительных границ погрешности результата измерений доверительная вероятность принимается, как правило, равной 0,95.

Составляющими погрешности прямых однократных измерений являются:

- погрешности средства измерения, рассчитываемые по их метрологическим характеристикам;
- погрешность используемого метода измерений, определяемая на основе анализа в каждом конкретном случае;
- личная погрешность, вносимая конкретным оператором. Если последние две составляющие не превышают 15 % погрешности средства измерения, то за погрешность результата однократного измерения принимают погрешность используемого средства измерения. Данная ситуация часто встречается на практике.

Названные составляющие могут состоять из неисключенных систематических и случайных погрешностей. При наличии нескольких систематических погрешностей, заданных своими границами $\pm \theta_i$ либо доверительными границами $\pm \theta_i(P)$, доверительная граница результата измерения соответственно может быть рассчитана по формуле (44)

$$\theta(P) = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2} \quad \text{или} \quad \theta(P) = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2(P_j)}{k_j^2}}, \quad (44)$$

где $\theta_i(P_j)$ – доверительная граница i -й неисключенной систематической погрешности, соответствующая доверительной вероятности P_j ; k_j – коэффициент, зависящий от P_j и определяемый так же, как и коэффициент k ; $k = k(m, P)$ – коэффициент, равный 0,95 при $P = 0,9$ и 1,1 при $P = 0,95$.

Случайные составляющие погрешности результата измерений выражаются либо своими средними квадратическими отклонениями S_{xi} , либо доверительными границами $\pm \varepsilon_i(P)$. В первом случае доверительная граница случайной составляющей погрешности результата прямого однократного измерения определяется через его среднее квадратическое отклонение S_x (45)

$$\varepsilon(P) = z_p S_x = z_p \sqrt{\sum_{i=1}^k S_{xi}^2}, \quad (45)$$

где z_p – точка нормированной функции Лапласа, отвечающей вероятности P . При $P = 0,95$ $z_p = 2$. Если средние квадратические отклонения S_{xi} определены экспериментально при небольшом числе измерений ($n < 30$), то в данной формуле вместо коэффициента z_p следует использовать коэффициент Стьюдента, соответствующий числу степеней свободы i -й составляющей, оценка которой произведена при наименьшем числе измерений.

В случае, когда случайные погрешности представлены доверительными границами $\pm \varepsilon_i(P_i)$, соответствующими разным доверительным вероятностям P_i , доверительная граница случайной погрешности результатов прямых однократных измерений (46)

$$\varepsilon(P) = z_p S_x = z_p \sqrt{\sum_{i=1}^k \varepsilon^2(P_i) / z_p^2}. \quad (46)$$

Найденные значения θ и $\varepsilon(P)$ используются для оценки погрешности результата прямых однократных измерений. В зависимости от соотношения θ и S_x суммарная погрешность определяется по одной из формул, приведённых в табл. 13. Значения коэффициента k_p приведены в табл. 14.

Таблица 13

Формулы для расчёта погрешности результата прямых однократных измерений $\Delta(P)$

<i>Значение θ/S_x</i>	<i>Погрешность результата измерения $\Delta(P)$</i>
$\theta/S_x < 0,8$	$\varepsilon(P)$
$0,8 \leq \theta/S_x \leq 8$	$k_p[\varepsilon(P) + \theta(P)]$
$\theta/S_x > 8$	$\theta(P)$

Таблица 14

Значение k_p в зависимости от отношения θ/S_x ,
про доверительной вероятности 0,95

θ/S_x	0,8	1	2	3	4	6	6	7	8
$k_{0,95}$	0,78	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81

Кроме изложенного метода, суммирование случайных и систематических составляющих может проводиться и другими методами.

Результат прямых однократных измерений должен записываться в виде $x \pm \Delta(P)$ при доверительной вероятности $P = P_d$.

Ранее были рассмотрены прямые однократные измерения с точным оцениванием погрешностей. В практике также имеют место прямые однократные измерения с приближенным оцениванием погрешности. Для них характерно оценивание погрешности полученного результата на основе метрологических характеристик, приведённых в нормативно-технической документации на используемые средства измерений. Поскольку эти характеристики относятся к любым экземплярам данного типа средств измерений, то у конкретного используемого средства действительные метрологические характеристики могут отличаться от нормированных.

Прямые однократные измерения с приближенным оцениванием погрешностей правомочны, если доказана возможность пренебрежения случайной составляющей погрешности измерения, т. е. можно обосновано считать, что среднее квадратическое отклонение S_x случайной составляющей меньше $1/8$ суммарной границы неисклученных систематических составляющих погрешности результата измерения.

В простейшем случае, когда влияющие величины соответствуют нормальным условиям, погрешность результата прямого однократного измерения равна пределу основной погрешности средства измерения $\Delta_{СИ}$, определяемой по нормативно-технической документации. Результат измерения запишется в виде $\Delta = \pm \Delta_{СИ}$. Доверительная вероятность не

указывается, но, как правило, подразумевается, что она равна 0,96. При проведении измерений в условиях, отличных от нормальных, необходимо определять и учитывать пределы дополнительных погрешностей.

4.7.3. Косвенные измерения

Косвенные измерения – это измерения, при которых искомое значение Q находят на основании известной зависимости (47)

$$Q = F(Q_1, Q_2, \dots, Q_m), \quad (47)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_m – значения, полученные при прямых измерениях. По виду функциональной зависимости F они делятся на две основные группы – линейные и нелинейные. Для линейных косвенных измерений математический аппарат статистической обработки полученных результатов разработан детально. Обработка результатов косвенных измерений производится, как правило, методами: основанными на раздельной обработке аргументов и их погрешностей; линеаризации; приведения.

Косвенные измерения при, линейной зависимости между аргументами. Линейная функциональная зависимость является простейшей формой связи между измеряемой величиной и находимыми посредством прямых измерений аргументами. Она может быть выражена формулой (48)

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i Q_i, \quad (48)$$

где b_i – постоянный коэффициент i -го аргумента Q_i ; m – число аргументов. Погрешности линейных косвенных измерений оцениваются методом, основанным на раздельной обработке аргументов и их погрешностей.

Если коэффициенты b_i определяют экспериментально, то нахождение результата измерения величины Q производится поэтапно. Сначала оценивают каждое слагаемое $b_i Q_i$, как кос-

венно измеряемую величину, полученную в результате произведения двух измеряемых величин, а потом находят оценку измеряемой величины Q . Результат косвенного измерения определяют по формуле (49)

$$\tilde{Q} = \sum_{i=1}^m b_i \tilde{Q}_i, \quad (49)$$

где \tilde{Q}_i – оценка результата измерений аргумента Q_i , получаемая, как правило, посредством обработки результатов многократных прямых измерений каждого из аргументов. При несмещённости и состоятельности результатов \tilde{Q}_i полученная оценка результата измерения \tilde{Q} будет также несмещённой и состоятельной. Поскольку дисперсия результата измерения (50)

$$D[Q] = \sum_{i=1}^m b_i^2 D[Q_i], \quad (50)$$

то, если результаты \tilde{Q}_i обладают минимальной дисперсией (т. е. являются эффективными), оценка результата измерения \tilde{Q}_i также будет эффективной.

При отсутствии корреляционной связи между аргументами среднего квадратического отклонения результата косвенного измерения $S(\tilde{Q})$, обусловленное случайными погрешностями, вычисляется по формуле (51)

$$s[\tilde{Q}] = \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 S^2(\tilde{Q}_i)}, \quad (51)$$

где $S(\tilde{Q}_i)$ – среднее квадратическое отклонение результата измерения аргумента q_i .

При наличии корреляционной связи между аргументами среднего квадратического отклонения результата косвенного измерения (52)

$$s[\tilde{Q}] = \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 S^2(\tilde{Q}_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \bar{P}_{ki} b_k b_i S(\tilde{Q}_k) S(\tilde{Q}_i)}. \quad (52)$$

Здесь ρ_{ki} – несмещенная оценка коэффициента корреляции между погрешностями аргументов Q_k и Q_i (53)

$$\bar{P}_{ki} = \frac{1}{n(n-1)S(\tilde{Q}_k)S(\tilde{Q}_i)} \sum_{i=1}^n (Q_{ki} - \tilde{Q}_k)(Q_{li} - \tilde{Q}_l), \quad (53)$$

где Q_{ki} , Q_{li} – i -е результаты прямых измерений k -го и l -го аргументов; n – число прямых измерений аргументов.

Корреляция между аргументами чаще всего возникает в тех случаях, когда их измерения проводятся одновременно и подвергаются одинаковому влиянию внешних условий (температуры, влажности, напряжения питающей сети, помех и т. п.). Критерием отсутствия связи между двумя аргументами является выполнение неравенства (54)

$$|\check{p}_{ki} \sqrt{n-2} / \sqrt{1-\check{p}_{kl}^2}| < t_q, \quad (54)$$

где t_q – коэффициент Стьюдента, соответствующий уровню значимости q и числу степеней свободы $n - 2$. Необходимо проверить отсутствие корреляционных связей между всеми парными сочетаниями аргументов.

Моделью для распределения результатов измерений отдельных аргументов обычно можно считать случайную величину с нормальным распределением. Для распределений, отличных от нормального, распределение среднего арифметического при этом все же можно считать нормальным. Случайную погрешность результата косвенного измерения, образующуюся путём сложения случайных погрешностей результатов определения многих аргументов, ещё с большим основанием

можно считать нормально распределенной случайной величиной. Это даёт возможность найти доверительный интервал для значения измеряемой величины.

При большом числе измерений (более 25–30), выполненных при нахождении каждого из аргументов, доверительную границу случайной погрешности результата косвенного измерения можно определить по формуле (55)

$$\varepsilon(P) = Z_p S(\tilde{Q}), \quad (55)$$

где Z_p – квантиль нормального распределения, соответствующий выбранной доверительной вероятности P .

При меньшем числе измерений для определения доверительного интервала используется распределение Стьюдента, число степеней свободы которого рассчитывается по приближенной формуле (56)

$$f = \left(\sum_{i=1}^m \frac{b_i^4 S^4(\tilde{Q}_i)}{n_i + 1} \right)^{-1} \left[\left(\sum_{i=1}^m b_i^2 S^2(\tilde{Q}_i) \right)^2 - 2 \left(\sum_{i=1}^m \frac{b_i^4 S^4(\tilde{Q}_i)}{n_i + 1} \right) \right], \quad (56)$$

где n_i – число измерений при определении аргумента Q_i . В этом случае при условии, что распределение погрешностей результатов измерения аргументов не противоречит нормальному распределению, доверительная граница случайной погрешности результата косвенного измерения (57)

$$\varepsilon(P) = t_q S(\tilde{Q}), \quad (57)$$

где t_q – коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности и числу степеней свободы f .

Систематическая погрешность результата косвенного измерения определяется систематическими погрешностями результатов измерений аргументов. При измерениях последние стремятся исключить. Однако полностью это сделать не удаётся, всегда остаются неисключенные систематические по-

грешности, которые рассматриваются как реализации случайной величины, имеющей равномерное распределение. Такое предположение приводит обычно к достаточно осторожным заключениям о погрешности результатов косвенных измерений.

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата линейного косвенного измерения в случае, если неисключенные систематические погрешности аргументов заданы границами, вычисляют по формуле (58)

$$\theta(P) = k \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \theta_i^2}, \quad (58)$$

где k – поправочный коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью P и числом m составляющих θ_i . Его значения приведены в табл. 15. Погрешность от применения этих усредненных коэффициентов не превышает 10 % .

Таблица 15

Значения коэффициента k при $m > 4$

P	0,90	0,95	0,98	0,99
k	0,95	1,1	1,3	1,4

Если число суммируемых слагаемых $m \leq 4$ и они значительно различаются между собой, то значение коэффициента k определяется по табл. 16. Под L здесь понимают отношение наибольшей длины интервала $(b_i \theta_i)_{\max}$ одного из слагаемых к длине $b_i \theta_i$ остальных слагаемых.

Если границы неисключенных систематических погрешностей результатов измерений аргументов заданы их доверительными границами $\theta_i(P_i)$, соответствующими вероятностям P_i , то границу $\theta(P)$ определяют по формуле (59)

$$\theta(P) = k \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 \theta_i^2(P_i) / k_i^2}. \quad (59)$$

Таблица 16

Значения коэффициента k при $m = 2, 3, 4$

L	$P=0,98$			$P = 0,99$		
	$m=2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
1	1,22	1,28	1,30	1,28	1,38	1,41
2	1,16	1,23	1,26	1,22	1,31	1,36
3	1,11	1,1	1,20	1,16	1,24	1,28
4	1,07	1,12	1,15	1,12	1,18	1,22
5	1,05	1,09	1,12	1,09	1,14	1,18

Коэффициенты k_i определяются так же, как поправочный коэффициент k .

Суммарная погрешность результата косвенного измерения оценивается на основе композиции распределений случайных и неисключенных систематических погрешностей. Формулы для её расчёта (в зависимости от соотношения границ неисключенной систематической составляющей и среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности) приведены в табл. 17.

Таблица 17

Погрешность результата косвенных измерений $\Delta(P)$

Значение $\theta(P)/S(\tilde{Q})$	Погрешность результата измерения $D(P)$
$\theta(P)/S(\tilde{Q}) < 0,8$	$\varepsilon(P)$
$0,8 < \theta(P)/S(\tilde{Q}) < 8$	$k_p[\varepsilon(P) + \theta(P)]$
$\theta(P)/S(\tilde{Q}) > 0,8$	$\varepsilon(P)$

Коэффициент k_p определяется по табл. 18.

Зависимость k_p от отношения $q(P)/S(\hat{Q})$ при различной доверительной вероятности

$q(P)/S(\hat{Q})$	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	7	8
$k_{0,95}$	0,81	0,77	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81
$k_{0,99}$	0,87	0,85	0,82	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85

Результат косвенных измерений должен записываться в виде $x \pm \Delta(P)$ при доверительной вероятности P .

4.7.4. Совместные и совокупные измерения

Эти виды измерений характеризуются тем, что значения искомых величин рассчитывают по системе уравнений, связывающих их с некоторыми другими величинами, определяемыми посредством прямых или косвенных измерений. При этом измеряются несколько комбинаций значений указанных величин. Каждая такая комбинация позволяет получить одно уравнение, а система содержит всю информацию о значениях искомых величин и имеет вид (60)

$$F_i(Q_1; Q_2; \dots; Q_i; \dots; Q_m; X_1^i; X_2^i; \dots; X_r^i; \dots; X_k^i) = 0, \quad (60)$$

где F – символ функциональной зависимости между величинами в i -м опыте; $i = 1; 2; \dots; n$; n – число опытов; Q_i – значения искомых величин, общее число которых равно m ; $X_r^{(i)}$ – полученные в i -м опыте значения k величин, измеряемых прямыми или косвенными методами.

Если Q_i являются значениями одной и той же величины, то измерения называются совокупными, если разных физических величин – совместными.

После подстановки в исходную систему уравнений результатов $X_r^{(i)}$ прямых или косвенных измерений и проведения необходимых преобразований получим n уравнений, содержащих лишь искомые величины и числовые коэффициенты (61)

$$F_i(Q_1; Q_2; \dots; Q_j; \dots; Q_m) = 0. \quad (61)$$

Такие уравнения называют условными.

Для того чтобы рассчитать значения искомых величин, достаточно иметь m уравнений, т. е. столько же, сколько содержится неизвестных. Тогда результаты измерений и доверительные границы их погрешностей можно найти методами обработки результатов косвенных измерений. Однако обычно для уменьшения погрешностей результатов измерений делается значительно больше измерений, чем это необходимо для определения неизвестных, т. е. $n > m$.

Вследствие ограниченной точности определения величин X_r условные уравнения одновременно не обращаются в тождества ни при каких значениях искомых величин. И поскольку найти истинные значения искомых величин невозможно, то задача сводится к нахождению их оценок, представляющих собой наилучшие приближения к истинным значениям. Предположим, что \tilde{Q}_j , где $j = 1, 2, \dots, m$, наилучшие приближения к неизвестным Q_j . Если значения этих оценок подставить в условные уравнения, то их правые части будут отличаться от левых. Для получения тождеств нужно записать

$$F_i(\tilde{Q}_1; \tilde{Q}_2; \dots; \tilde{Q}_j; \dots; \tilde{Q}_m) = 0.$$

где v_i – величины, называемые остаточными погрешностями условных уравнений. Если в систему условных уравнений подставить истинные значения искомых величин, то остаточные погрешности превратятся в случайные погрешности условных уравнений. Одним из наиболее общих способов отыскания оценок истинных значений измеряемых величин является регрессионный анализ, или, как его часто называют, метод наименьших квадратов. Согласно ему, оценки Q выбираются так, чтобы минимизировать сумму квадратов остаточных погрешностей условных уравнений. Сумма квадратов остаточных погрешностей, составляет (62)

$$S^2 = \sum_{i=1}^n v_i^2 = \sum_{i=1}^n F_i^2(\bar{Q}_1; \bar{Q}_2; \dots; \bar{Q}_j; \dots; \bar{Q}_m) \quad (62)$$

и достигает минимума при системе значений Q_j , обращающей в нуль все частные производные от S_2 по искомым величинам (63)

$$\frac{\partial}{\partial \bar{Q}_j} \sum_{i=1}^n V_i^2 = 0. \quad (63)$$

Выражая остаточные погрешности через функции, стоящие в левой части условных уравнений, получаем систему из m уравнений с m неизвестными (64)

$$\sum_{i=1}^n F_i \frac{\partial F_i}{\partial \bar{Q}_j} = 0. \quad (64)$$

где $j = 1, 2, \dots, m$, которая может быть решена относительно оценок q_j искомым величин.

При решении задачи в общем случае, когда условные уравнения нелинейны, а результаты отдельных измерений коррелированы, иногда возникает ряд непреодолимых трудностей. Задача относительно несложно решается лишь тогда, когда условные уравнения линейны или приведены к линейным известными способами и при отсутствии корреляции между результатами отдельных наблюдений.

Оценки, даваемые методом наименьших квадратов, являются состоятельными и несмещёнными, а при нормальном распределении результатов измерений и эффективными.

Контрольные вопросы

1. Перечислите возможные проявления погрешностей.
2. Назовите признаки, по которым классифицируются погрешности.

3. Сформулируйте свойства случайной, систематической и прогрессирующей составляющих погрешности измерений.
4. Приведите известные вам примеры методических погрешностей.
5. Что такое систематическая погрешность? Приведите примеры.
6. Каким образом классифицируются систематические погрешности?
7. Назовите способы выявления постоянных систематических погрешностей.
8. Назовите способы выявления переменных систематических погрешностей.
9. При каких условиях погрешность измерения может рассматриваться как случайная величина?
10. Какие точечные оценки законов распределения вы знаете? Какие требования предъявляются к ним?
11. Что такое доверительный интервал? Какие «способы» его задания вам известны?
12. Что такое грубые погрешности и промахи? Как определить их присутствие в выборке по виду закона распределения или гистограмме?
13. Расскажите о критерии «трех сигм» и его модификациях.
14. Как применить критерий Романовского для исключения из выборки промахов?
15. Дайте определение неопределённости измерений.
16. Каким образом классифицируется неопределённость измерений?
17. Что такое гистограмма, полигон и кумулятивная кривая?
18. Перечислите этапы обработки результатов прямых многократных измерений.
19. Для чего необходимо идентифицировать форму закона распределения результатов измерений? Расскажите, каким образом это делается.

20. Напишите алгоритм обработки результатов однократных измерений с точным оцениванием погрешностей.

21. Как обрабатываются результаты линейных косвенных измерений?

Глава 5. Теория построения средств измерений

5.1. Основные понятия теории построения средств измерений

В теории построения средств измерений обобщается опыт построения средств и методов измерений.

Согласно РМГ 29-2013 «Метрология. Основные термины и определения», средства измерений входят в более широкое понятие «средства измерительной техники». Средство измерительной техники – это обобщающее понятие, охватывающее технические средства, специально предназначенные для измерений. Оно включает в себя средства измерений, эталоны, измерительные системы, измерительные установки, измерительные принадлежности, средства сравнения, стандартные образцы и т. д. (см. рис. 21).

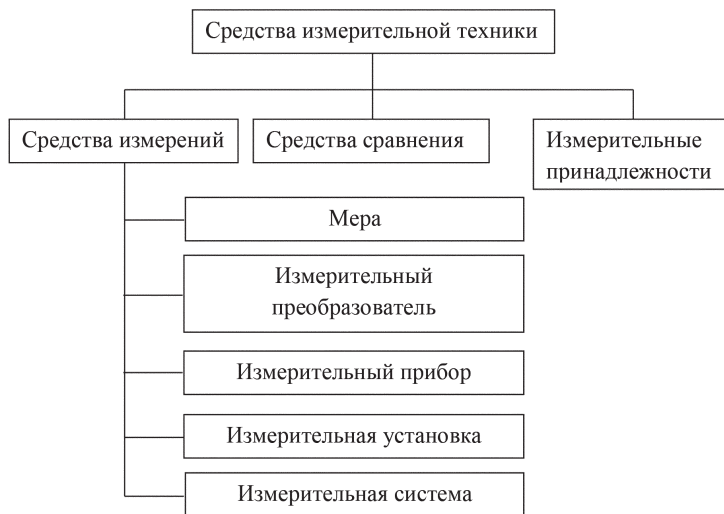


Рис. 21. Терминологическая схема

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений и имеющее нормированные метрологические характеристики. Метрологической называется характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений.

Средство сравнения – техническое средство или определенная среда, посредством которых возможно выполнять сравнение друг с другом мер однородных величин или показания измерительных приборов. Частным случаем средства сравнения является компаратор, т. е. средство измерения, предназначенное для сличения мер однородных величин, измерительных преобразователей и измерительных приборов.

Примеры средств сравнения:

- рычажные весы, на одну чашку которых устанавливается эталонная гиря, а на другую поверяемая являются средством для их сравнения;

- жидкость для сравнения показаний ареометров служит необходимой средой для градуировки;

- температурное поле, создаваемое термостатом для сравнения показаний термометров, является средой сравнения.

Измерительные принадлежности – вспомогательные средства, служащие для обеспечения необходимых условий для выполнения измерений с требуемой точностью. Измерительные принадлежности предназначены для защиты от воздействия влияющих величин. Например: термостат, барокамера, специальные противовибрационные фундаменты, устройства, экранирующие влияние электромагнитных полей, тренога для установки прибора по уровню.

Мера – средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с приписанными им значениями. Например: эталонная гиря, линейная шкала (линейка), концевая мера длины, меры твердости (минералы различной твердости по шкале Мооса), аттестованный стандартный образец. Мера может выступать в качестве эталона.

Эталон – средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины или шкалы измерений.

Измерительный преобразователь – средство измерений или его часть, служащее для получения и преобразования информации об измеряемой величине в форму, удобную для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия. Например: вольтметр, микрометр, термометр, электронные весы.

Измерительная установка – это совокупность функционально объединённых и расположенных в одном месте мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких величин.

Измерительная система – это совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещённых в разных точках объекта измерения, функционально объединённых с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту. Например: измерительная система теплоэлектростанции, позволяет получать измерительную информацию о значении технологических параметров в различных энергоблоках.

5.2. Меры и эталоны

Меры, как указывалось выше, предназначены для хранения и воспроизведения физических величин определённых размеров. Операцию воспроизведения величины заданного размера можно формально представить как преобразование цифрового кода N в заданную физическую величину X_m , основанное на единице данной физической величины $[Q]$. Уравнение преобразования можно записать в виде $X_m = N [Q]$.

Выходом меры является квантованная аналоговая величина X_M заданного размера, а входом следует считать числовое значение величины N (см. рис. 22).

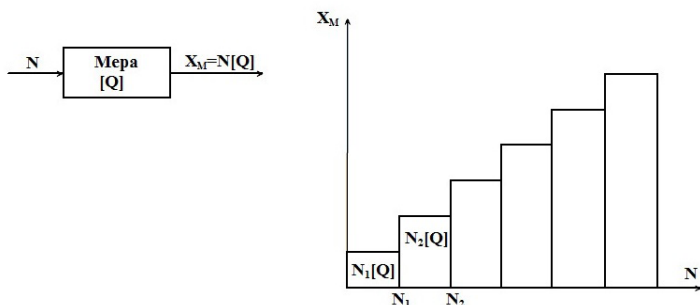


Рис. 22. Обозначение меры в структурных схемах и функция преобразования многозначной меры

Меры подразделяют на следующие типы:

- однозначные, воспроизводящие физическую величину одного размера, например: гиря 1 кг (см. рис. 23а), плоскопараллельная концевая мера длины 100 мм (см. рис. 23б), конденсатор постоянной ёмкости;
- многозначные, воспроизводящие физическую величину разных размеров, например: металлическая линейка (см. рис. 23в), конденсатор переменной ёмкости.

Меры выпускаются, как единичными экземплярами, так и наборами (см. рис. 23д). Набор мер конструктивно оформленный, как одно устройство, имеющее возможность объединять их в различных комбинациях, называют магазином мер. Мерами могут комплектоваться средства измерения для их настройки. В этом случае меры называют установочными. Например, установочные меры для гладких микрометров с нижним пределом измерения свыше 25 мм (см. рис. 23е).



Рис. 23. Меры:

а – гиря; б – плоскопараллельная концевая мера длины; в – металлическая линейка; г – установочная мера для гладких микрометров; д – набор плоскопараллельных концевых мер длины

Степень совершенства меры определяется постоянством размера каждой ступени квантования $[Q]$ и степенью многозначности, т. е. числом N воспроизводимых известных зна-

чений её выходной величины. С наиболее высокой точностью посредством мер воспроизводятся основные физические величины: длина, масса, частота, напряжение и ток.

Если мера используется для передачи единицы величины, то она выполняет функции эталона. Эталон в отличие от меры предназначен не только для воспроизведения и хранения единицы величины, но и для её передачи. Таким образом, эталон выполняет три функции – воспроизведение, хранение и передачу единицы величины.

Воспроизведение единицы величины – это совокупность операций по материализации единицы величины с помощью первичного эталона.

Хранение единицы – это совокупность операций, обеспечивающих неизменность во времени размера единицы, воспроизводимой, хранимой и передаваемой данным эталоном.

Передача единицы величины – это приведение размера величины, хранимой средством измерений, к единице величины, воспроизводимой или хранимой эталоном данной единицы величины или стандартным образцом.

Эталоны принято делить на первичные и вторичные, эталоны сравнения и рабочие эталоны. Первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы величины с наивысшей точностью. Вторичный получает единицу величины непосредственно от первичного эталона этой величины. Эталон сравнения применяется для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом. Рабочий эталон предназначен для передачи единицы величины или шкалы измерений средствам измерений. При необходимости рабочие эталоны подразделяют на разряды (1-й, 2-й...). В этом случае передачу единицы осуществляют через цепочку соподчинённых по разрядам рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в цепочке единицу передают средству измерения.

5.3. Измерительные преобразователи

Процесс измерения связан с получением и обработкой информации об объекте измерения. Физический носитель информации, один или несколько параметров, которого функционально связаны с измеряемой величиной, принято называть измерительным сигналом. При прохождении по измерительной цепи измерительный сигнал подвергается преобразованиям в специальных устройствах – измерительных преобразователях.

По расположению в измерительной цепи измерительные преобразователи подразделяются на первичные и промежуточные. Первичным называют преобразователь, на который непосредственно воздействует материальный объект или явление, являющееся носителем величины, подлежащей измерению. Все прочие преобразователи называют промежуточными. Конструктивно обособленный первичный преобразователь или совокупность первичного и других измерительных преобразователей называют датчиком.

Основной метрологической характеристикой измерительного преобразователя является функция преобразования $X = F(x)$, определяющая зависимость выходного сигнала X от входного сигнала x .

Наиболее типичными являются следующие виды измерительных преобразований:

- изменение физического рода преобразуемой величины (жидкостный термометр);
- масштабное линейное преобразование (микроскоп измерительный);
- масштабное-временное преобразование (самописец);
- иное функциональное преобразование.

По характеру преобразования измерительные преобразователи подразделяются на аналоговые (на входе аналоговый сигнал – на выходе также аналоговый сигнал), аналого-цифровые (на входе аналоговый сигнал – на выходе цифровой сигнал) и цифро-аналоговые (на входе цифровой сигнал – на выходе аналоговый сигнал).

5.4. Средства измерений

Для отнесения технического средства к средствам измерения необходимо выполнение двух условий:

- средство должно использоваться для измерения, т. е. для экспериментального определения значения определённой величины;
- средство должно иметь нормированные метрологические характеристики.

Значение величины – это выражение размера величины в виде некоторого числа принятых единиц по соответствующей шкале измерений. То есть значение величины определяется посредством сравнения величины с её единицей или соотношения со шкалой. В общем случае средство измерения состоит из одного или нескольких измерительных преобразователей, однозначной или многозначной меры и средства сравнения (см. рис. 24).



Рис. 24. Обобщенная структурная схема средства измерений

Входной измерительный сигнал x от объекта измерения поступает на вход первичного измерительного преобразователя и далее через совокупность промежуточных измерительных преобразователей в преобразованном виде $X = F(x)$ на первый вход средства сравнения. При отсутствии совокупно-

сти измерительных преобразователей сигнал x поступает непосредственно на первый вход средства сравнения. Сигнал на второй вход средства сравнения поступает с выхода меры.

Средство сравнения позволяет установить соотношение между величинами преобразованного $X = F(x)$ или не преобразованного измерительного сигнала $X = x$ с сигналом формируемым мерой X_m . Возможные результаты сравнения:

$$\begin{aligned} X &< X_m; \\ X &> X_m; \\ X &= X_m. \end{aligned}$$

Точное совпадение X и X_m встречается достаточно редко, так как сигнал X может принимать любые значения, а сигнал X_m квантован и может принимать только значения кратные $[Q]$. Результат сравнения указывает на необходимость увеличения или уменьшения цифрового кода меры для выполнения условия $|X - X_m| < [Q]$. В качестве результата измерения может использоваться как значение цифрового кода меры $Y = N$, так и аналоговая величина $Y = X_m$.

Простейшим примером средства измерений является линейка (см. рис. 23в), представляющая собой многозначную штриховую меру длины. В процессе измерения длины произвольного объекта оператор совмещает торец линейки с одной гранью объекта и производит отсчёт по делению шкалы линейки точно или приблизительно совпадающему с противоположной гранью. В этом примере средство измерений состоит только из многозначной меры. Измерительный преобразователь отсутствует, а функции средства сравнения берёт на себя оператор.

Средства измерений подразделяются на виды и типы.

Вид средств измерений – это совокупность средств измерений, предназначенных для измерений определённой физической величины. Например: средство измерений силы электрического тока, линейных или угловых размеров и т. д.

Тип средств измерений – это совокупность средств измерений одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструк-

цию и изготовленных по одной и той же технической документации. Например: линейка, штангенциркуль, микрометр для измерений линейных размеров.

Средств измерений, используемые в различных отраслях науки и техники, чрезвычайно многообразны, однако можно выделить некоторые общие признаки, присущие всем средствам измерений независимо от области применения. Эти признаки положены в основу различных классификаций СИ.

По метрологическому назначению различают эталонные, или метрологические, и рабочие средства измерений. Эталонные (метрологические) средства измерений используются для передачи размера единицы физической величины другим эталонным или рабочим средствам измерений, т. е. предназначены для обеспечения единства измерений, а рабочие используются непосредственно для определения размера искомой физической величины и не связаны с передачей размера единицы величины.

По уровню автоматизации средства измерений подразделяются на ручные или неавтоматизированные, автоматизированные и автоматические. При использовании ручных средств измерений все измерительные операции выполняются вручную оператором, автоматизированных – часть операций выполняется с участием оператора, а часть без участия, автоматических – все операции выполняются без участия человека.

По уровню стандартизации различают стандартизованные и не стандартизованные средства измерений. Большинство средств измерений являются стандартизованными, то есть изготавливаются в соответствии с требованиями стандартов. Не стандартизованные средства измерений выпускаются предприятиями и организациями в единичных экземплярах, и предназначены они для решения специальных измерительных задач, не требующих стандартизации требований к их изготовлению и эксплуатации.

По отношению к измеряемой величине средства измерений принято делить на основные и вспомогательные. Основные предназначены для измерения величины, которую необ-

ходимо определить в соответствии с измерительной задачей, а вспомогательные предназначены для измерения величин, влияние которых на средство измерений или объект измерения необходимо учитывать для обеспечения требуемой точности результата основного измерения.

Более сложной является классификация средств измерений по выполняемым функциям (см. рис. 25).

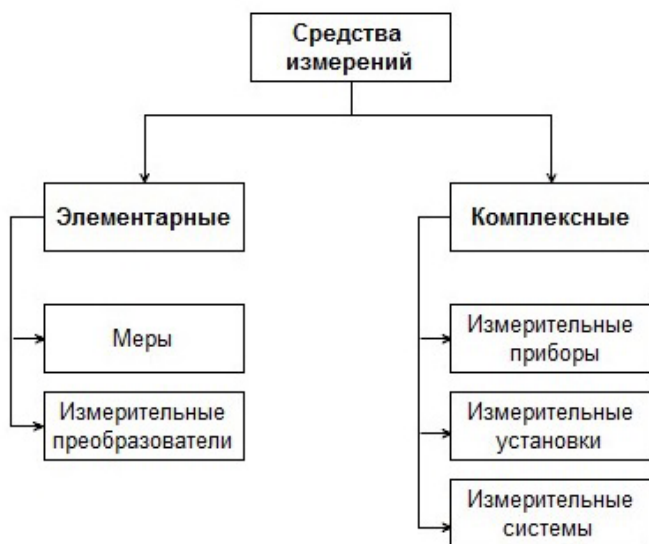


Рис. 25. Классификация средств измерений по выполняемым функциям

Элементарные средства измерений реализуют одну из элементарных измерительных операций (хранение и/или воспроизведение размера величины, преобразование измерительного сигнала), а комплексные средства измерений предназначены для реализации всей процедуры измерений.

5.5. Метрологические характеристики средств измерений

Метрологической называется характеристика одного из свойств средства измерений, оказывающая влияние на результат измерения. Свойство средства измерения сохранять неизменными с течением времени метрологические характеристики называется стабильностью средства измерений. Стабильность может быть выражена интервалом времени, в течение которого метрологическая характеристика измениться на установленное значение, или изменением характеристики за установленный интервал времени (нестабильностью средства измерений).

ГОСТ 8.009-84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» подразделяет метрологические характеристики на несколько групп, наиболее важными из которых являются:

- характеристики, предназначенные для определения результатов измерений (например, цена деления шкалы измерительного прибора);
- характеристики погрешностей средств измерений (например, значение систематической составляющей погрешности средства измерений);
- характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам (например, изменение значений метрологической характеристики средства измерений вызванное изменением влияющих величин в установленных пределах).

Совокупность метрологических характеристик средства измерений, влияющих на точность измерений, принято называть точностными характеристиками средств измерений. К точностным характеристикам относятся погрешность средства измерений, его нестабильность, смещение нуля и др.

Погрешность средства измерений – это разность между показанием средства измерений и известным действительным значением величины. Наибольшее значение погрешности, установленное в нормативной документации для данного типа средств измерений (при котором оно ещё признается метро-

логически исправным), называется пределом допускаемой погрешности средства измерений. Метрологически исправным считается средство измерений, у которого все нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям.

Постоянная или закономерно изменяющаяся погрешность средства измерений называется систематической, а случайно изменяющаяся – случайной погрешностью средства измерений. Систематическая погрешность разных экземпляров средства измерений одного типа, как правило, различна.

Основной погрешностью называется погрешность средства измерений, применяемого в нормальных условиях, а дополнительной – составляющая погрешности средства измерений, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального значения или её выхода за пределы нормальной области значений.

Инструментальная неопределённость – составляющая неопределённости измерений, обусловленная применяемым средством измерений. Инструментальную неопределённость, как правило, определяют при калибровке средства измерений. Информация, касающаяся инструментальной неопределённости, может быть приведена в спецификации средства измерений.

Как было указано ранее, измерительный прибор информацию об измеряемой величине представляет в форме доступной для непосредственного восприятия человеком. Если информация представлена в визуальной форме, то измерительный прибор называют показывающим. К основным метрологическим характеристикам показывающих измерительных приборов относят характеристики их шкал (см. рис. 26).

Шкала измерительного прибора – часть средства измерений, представляющая собой упорядоченный набор меток вместе со значениями соответствующей величины. Длина линии, проходящей через середины самых коротких отметок шкалы

и ограниченная начальной и конечной метками, называется длиной шкалы. Линия может быть как прямолинейной, так и криволинейной.

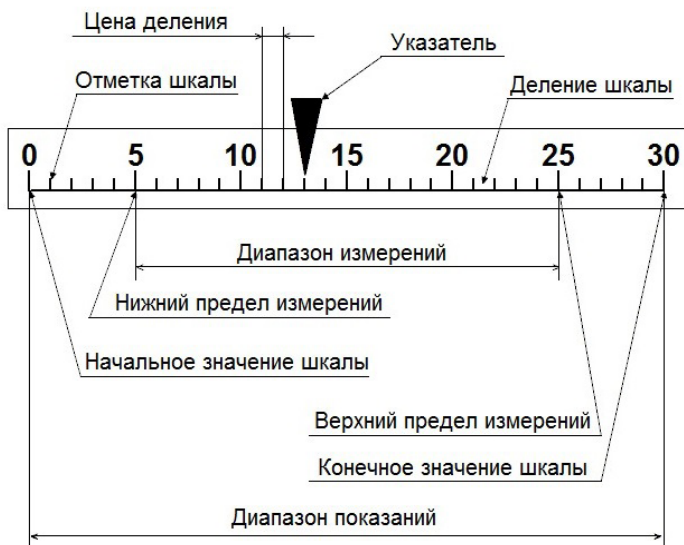


Рис. 26. Характеристики шкал измерительных приборов

Участок шкалы, ограниченный двумя соседними отметками называется делением шкалы.

Цена деления шкалы – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений.

Начальное значение шкалы – наименьшее значение величины, которое может быть отсчитано по шкале средства измерений (например, для медицинского термометра начальным значением шкалы является $34,3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Конечное значение шкалы – наибольшее значение величины, которое может быть отсчитано по шкале средства измерений (например, для медицинского термометра конечным значением шкалы является $42\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Указатель – это часть отсчётного устройства, положение которого относительно отметок шкалы определяет показание измерительного прибора, то есть определяет значение величины, формируемое средством измерений. Указатель, как правило, выполняется в виде подвижных стрелок разной формы. Область значений шкалы измерительного прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы, называется диапазоном показаний.

Диапазон измерений – множество значений величин одного рода, которые могут быть измерены данным средством измерений с указанными инструментальной неопределённостью или указанными показателями точности при определённых условиях.

Вариация показаний измерительного прибора – это разность показаний в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

Порог чувствительности средства измерений – наименьшее значение изменения величины, начиная с которого может осуществляться её измерение данным средством измерения. Например, если изменение массы, которое вызывает перемещение стрелки весов, составляет 10 мг, то порог чувствительности весов равен 10 мг.

5.6. Класс точности средства измерений

Обобщенной характеристикой уровня точности средств измерений данного типа является класс точности. Класс точности даёт возможность судить о значениях инструментальных погрешностей или инструментальных неопределённостей средств измерений данного типа при выполнении измерений. Классы точности устанавливаются в стандартах или технических условиях, содержащих технические требования к средствам измерений.

Средствам измерений с двумя и более диапазонами измерений одной физической величины, допускается присваивать различные классы точности на каждый диапазон. Средствам измерений, предназначенным для измерения двух и более физических величин, также допускается присваивать различные классы точности для каждой измеряемой величины.

В соответствии с ГОСТ 8.401-80 «Классы точности средств измерений. Общие требования» при назначении классов точности нормируются пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей. В зависимости от характера измерения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения средств измерений конкретного вида, пределы допускаемых погрешностей следует выражать в форме абсолютных, приведённых или относительных погрешностей.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливают по формуле (65)

$$\Delta = \pm \alpha \quad (65)$$

или (66)

$$\Delta = \pm (\alpha + bx), \quad (66)$$

где Δ – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, выраженной в единицах измеряемой величины на входе (выходе) или условно в делениях шкалы;

x – значение измеряемой величины на входе (выходе) средств измерений или число делений, отсчитанных по шкале;
 a, b – положительные числа, не зависящие от x .

Пределы допускаемой приведённой основной погрешности следует устанавливать по формуле (67)

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm p, \quad (67)$$

где γ – пределы допускаемой приведённой основной погрешности, %;

Δ – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности;

X_N – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ ;

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

Нормирующее значение X_N для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, если нулевое значение входного (выходного) сигнала находится на краю или вне диапазона измерений, следует устанавливать равным большему из пределов измерений или равным большему из модулей пределов измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений. Для электроизмерительных приборов с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений нормирующее значение допускается устанавливать равным сумме модулей пределов измерений.

Для средств измерений физической величины, для которых принята шкала с условным нулем, нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений. Например, для милливольтметра термоэлектрического термометра с пределами измерений 200 и 600 °С нормирующее значение $X_N = 400$ °С.

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

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

Пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по формуле (68)

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm q, \quad (68)$$

если Δ установлено по формуле (65) или по формуле (69)

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_K}{x} \right| \right) - 1 \right], \quad (69)$$

если Δ установлено по формуле (66),

где δ – пределы допускаемой относительной основной погрешности, %;

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

X_K – больший (по модулю) из пределов измерений;

c, d – положительные числа, выбираемые из ряда $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$ ($n=1, 0, -1, -2$, и т. д.);

$$c = b + d;$$

$$d = \frac{a}{|X_K|}.$$

Для обозначения класса точности используются символы или числа, принятые в нормативно-технической документации на средства измерений. Обозначения наносятся на циферблаты, корпуса средств измерений или приводятся в нормативно-технической документации.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме абсолютных погрешностей или относительных погрешностей, если последние установлены в виде графика, таблицы или формулы, отличной от (68) и (69), классы точности следует обозначать в документации прописными буквами латинского алфавита или римскими цифрами. В необходимых случаях к обозначению класса точности буквами латинского алфавита допускается добавлять индексы в виде арабской цифры. Классам точности, которым соответствуют меньшие пределы допускаемых погрешностей, должны соответствовать буквы, находящиеся

ближе к началу алфавита, или цифры, означающие меньшие числа. Например, в соответствии с ГОСТ 7328-2001 «Гири. Общие технические условия» в зависимости от нормируемых значений метрологических характеристик гири подразделяют на семь классов точности: E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_2 , M_3 . В табл. 19 приведены пределы допускаемых отклонений действительного значения массы от номинального значения для гири 1 кг для различных классов точности (в мг).

Таблица 19

Пределы допускаемых отклонений действительного значения массы от номинального значения для гири 1 кг для различных классов точности

E_1	E_2	F_1	F_2	M_1	M_2	M_3
$\pm 0,5$	$\pm 1,5$	± 5	± 15	± 50	± 150	± 500

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых выражены в форме приведённой погрешности классы точности следует обозначать числами, которые равны этим пределам, выраженным в процентах.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме относительных погрешностей в соответствии с формулой (69), классы точности в документации следует, обозначать числами c и d , разделяя их косой чертой.

Правила построения и примеры обозначения классов точности в документации и на средствах измерений приведены в табл. 20 и на рис. 27–30.

Таблица 20

**Правила построения и примеры обозначения классов точности
в документации и на средствах измерений**

Форма выражения погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности	
			в документации	на средствах измерений
Приведённая	По формуле (67) если нормирующее значение выражено в единицах	$\gamma = \pm 1,5$	Класс точности 1,5	1,5 (см. рис. 27)
	По формуле (67) если нормирующее значение принято равным длине шкалы или её части	$\gamma = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	0,5 (см. рис. 28) 2,5
Относительная	По формуле (68)	$\delta = \pm 2,5$	Класс точности 2,5	(см. рис. 29)
	По формуле (69)	$\delta = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\left \frac{X_k}{x} \right - 1 \right) \right]$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01 (см. рис. 30)

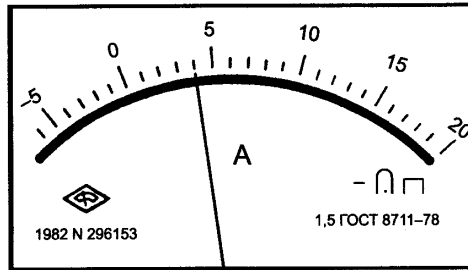


Рис. 27. Лицевая панель амперметра класса точности 1,5

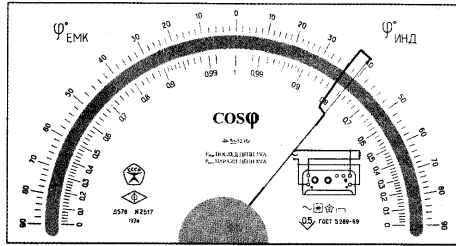


Рис. 28. Лицевая панель фазометра класса точности 0,5

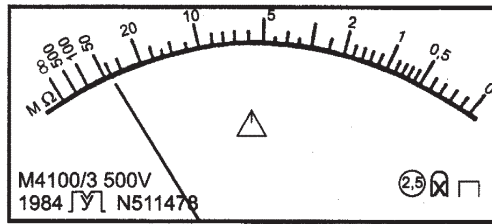


Рис. 29. Лицевая панель мегомметра класса точности 2,5

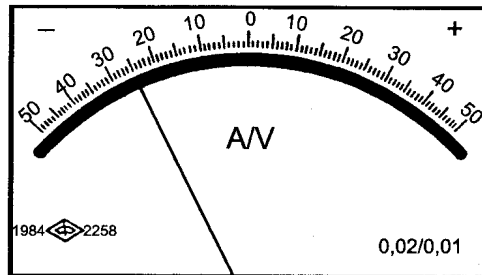


Рис. 30. Лицевая панель ампервольтметра класса точности 0,02/0,01

Контрольные вопросы

1. Что понимается под средством измерений? Приведите классификацию средств измерений.

2. Для чего применяются измерительные преобразователи, меры, средства сравнения?
3. Приведите классификацию мер и эталонов.
4. Приведите классификацию измерительных преобразователей.
5. Дайте определение метрологической характеристики. На какие группы подразделяются метрологические характеристики?
6. Приведите метрологические характеристики показывающих измерительных приборов.
7. Что понимается под классом точности средства измерений и как они обозначаются?

Заключение

Результат любого измерения заслуживает внимания лишь при условии, что он сопровождается оценкой погрешности измерения. С другой стороны, важно не только уметь выполнить измерение и оценить погрешность результата, но и так спланировать и осуществить процедуру измерения, чтобы обеспечить требуемую точность или свести погрешности к минимуму.

Чтобы успешно справиться с многочисленными и разнообразными проблемами измерений, необходимо освоить некоторые общие принципы их решения, нужен единый научный и законодательный фундамент, обеспечивающий на практике высокое качество измерений независимо от того, где и с какой целью они производятся. Таким фундаментом является метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Материал учебного пособия «Метрология. Часть 1» включает в себя пять взаимосвязанных разделов, которые обеспечивают в совокупности необходимый уровень знаний по теоретической метрологии бакалавров по направлению подготовки 27.03.01 *Стандартизация и метрология*.

Основные положения теоретической метрологии, представленные в учебном издании, станут фундаментом, на основе которого студенты получат знания в области метрологии.

Библиографический список

1. Анцыферов, С. С. Общая теория измерений: учеб. пособие / С. С. Анцыферов, Б. И. Голубь; под ред. РАН Н. Н. Евтихьева. – Москва: Телеком, 2007. – 176 с.
2. Бурдун, Г. Д. Основы метрологии: учеб. пособие / Г. Д. Бурдун, Б. Н. Марков. – Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 312 с.
3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – Москва: Наука, 1969. – 576 с.
4. ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.leotec.ru> (дата обращения: 20.09.2017).
5. ГОСТ Р 54500.1-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009. неопределённость измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределённости измерения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.leotec.ru> (дата обращения: 21.09.2017).
6. ГОСТ Р 54500.3-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.docs.leotec.ru> (дата обращения: 25.09.2017).
7. ГОСТ Р 8.885–2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Основные положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.leotec.sntd.ru> (дата обращения: 23.09.2017).
8. Грановский, В. А. Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения / В. А. Грановский. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. – 314 с.
9. Димов, Ю. В. Метрология, стандартизация, сертификация / Ю. В. Димов. – Санкт-Петербург: Питер, 2013 – 496 с.
10. Земельман, М. А. Метрологические основы технических измерений / М. А. Земельман. – Москва: Изд-во стандартов, 1991. – 285 с.

11. Иванов, В. А. Первичные преобразователи информации: учеб. пособие / В. А. Иванов, М. Я. Марусина, В. Л. Ткалич. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГИТМО, 2002. – 103 с.
12. Ким, К. К. Метрология, стандартизация, сертификация / К. К. Ким. – Санкт-Петербург: Питер, 2006. – 367 с.
13. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва: Наука, 1984. – 831 с.
14. Коротков, В. П. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств / В. П. Коротков, Б. А. Тайц. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 352 с.
15. Кузнецов, В. А. Метрология / В. А. Кузнецов, Л. К. Исаев, И. А. Шайко. – Москва: Стандартиформ, 2005. – 300 с.
16. Кузнецов, В. А. Общая метрология / В. А. Кузнецов, Г. В. Ялунина. – Москва: Изд-во стандартов, 2001. – 272 с.
17. Лячнев, В. В. Основы фундаментальной метрологии: учеб. пособие / В. В. Лячнев, Т. Н. Сирая, Л. И. Довбета; под ред. В. В. Лячнев. – Санкт-Петербург: Элмор, 2007. – 424 с.
18. Марусина, М. Я. Основы метрологии, стандартизации и сертификации: учеб. пособие / М. Я. Марусина, В. Л. Ткалич, Е. А. Воронцов. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2009. – 164 с.
19. Миронов, Э. Г. Метрология и технические измерения: учеб. пособие / Э. Г. Миронов, Н. П. Бессонов. – Москва: КноРус, 2015. – 422 с.
20. Назаров, Н. Г. Метрология. Основные понятия математические модели: учеб. пособие / Н. Г. Назаров. – Москва: Высшая школа, 2002. – 348 с.
21. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 245 с.
22. Рабинович, С. Г. Погрешности измерений / С. Г. Рабинович. – Ленинград: Энергия, 1978. – 196 с.
23. Рейх, Н. Н. Метрологическое обеспечение производства / Н. Н. Рейх, А. А. Тупиченков, В. Г. Цейтлин; под ред. Л. К. Исаева. – Москва: Изд-во стандартов, 1987. – 308 с.

24. РМГ 29–2013. Рекомендации по межгосударственной стандартизации ГСИ. «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения». – Москва: Изд-во стандартов, 2015. – 45 с.
25. Российская метрологическая энциклопедия / под ред. Ю. В. Тарбеева. – Санкт-Петербург: Лики России, 2001. – 849 с.
26. Сергеев, А. В. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник / А. В. Сергеев, В. В. Терегеря. – Москва: Юрайт, 2011. – 820 с.
27. Сергеев, А. В. Метрология: учеб. пособие / А. В. Сергеев, В. В. Крохин. – Москва: Логос, 2001 – 408 с.
28. Сергеев, А. Г. Метрология и метрологические обеспечение: учебник / А. Г. Сергеев. – Москва: Высшее образование, 2008. – 575 с.
29. Теория измерений: учеб. пособие / Т. И. Мурашкина [и др.]. – Москва: Высшая школа, 2007. – 151 с.
30. Тюрин, Н. И. Введение в метрологию / Н. И. Тюрин. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. – 304 с.
31. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gost.ru> (дата обращения: 21.09.2017).
32. Фридман, А. Э. Основы метрологии. Современный курс / А. Э. Фридман. – Санкт-Петербург: Профессионал, 2008. – 284 с.
33. Шишкин, И.Ф. Теоретическая метрология / И. Ф. Шишкин. – Москва: Изд-во стандартов, 1990. – 492 с.
34. Шостьин, Н. А. Очерки истории русской метрологии. XI – начало XX века / Н. А Шостьин; науч. ред. Л. Н. Брянский. – Москва: Изд-во стандартов, 1975. – 272 с.

Приложения

Приложение А

Таблица

Значения функции Лапласа

<i>t</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
0,0	0,0000	0,0040	0,0080	0,0120	0,0160	0,0199	0,0239	0,0279	0,0319	0,0359
0,1	0398	0438	0478	0517	0557	0596	0636	0675	0714	0753
0,2	0793	0832	0871	0910	0948	0987	1026	1064	1103	1141
0,3	1179	1217	1255	1293	1331	1368	1406	1443	1480	1517
0,4	1554	1591	1628	1664	1700	1736	1772	1808	1844	1879
0,5	1915	1950	1985	2019	2054	2088	2123	2157	2190	2224
0,6	2257	2291	2324	2357	2389	2422	2454	2486	2517	2549
0,7	2580	2611	2642	2673	2703	2734	2764	2794	2823	2852
0,8	2881	2910	2939	2967	2995	3023	3051	3078	3106	3133
0,9	3159	3186	3212	3238	3264	3289	3315	3340	3365	3389
1,0	3413	3438	3461	3485	3508	3531	3554	3577	3599	3621
1,1	3643	3665	3686	3708	3729	3749	3770	3790	3810	3830
1,2	3849	3869	3888	3907	3925	3944	3962	3980	3997	4015
1,3	4032	4049	4066	4082	4099	4115	4131	4147	4162	4177
1,4	4192	4207	4222	4236	4251	4265	4279	4292	4306	4319
1,5	4332	4345	4357	4370	4382	4394	4406	4418	4429	4441
1,6	4452	4463	4474	4484	4495	4505	4515	4525	4535	4545
1,7	4554	4564	4573	4582	4591	4599	4608	4616	4625	4633
1,8	4641	4649	4656	4664	4671	4678	4686	4693	4699	4706
1,9	4713	4719	4726	4732	4738	4744	4750	4756	4761	4767
2,0	4772	4778	4783	4788	4793	4798	4803	4808	4813	4817
2,1	4821	4826	4830	4834	4838	4842	4846	4850	4854	4857
2,2	4861	4864	4868	4871	4874	4878	4881	4884	4887	4890
2,3	4893	4896	4898	4901	4904	4906	4909	4911	4913	4916
2,4	4918	4920	4922	4925	4927	4929	4931	4932	4934	4936
2,5	4938	4940	4941	4943	4945	4946	4948	4949	4951	4952
2,6	4953	4955	4956	4957	4959	4960	4961	4962	4963	4964
2,7	4965	4966	4967	4968	4969	4970	4971	4972	4973	4974
2,8	4974	4975	4976	4977	4977	4978	4979	4979	4980	4981
2,9	4981	4982	4982	4983	4984	4984	4985	4985	4986	4886
3,0	4986									
3,5	4998									
4,0	4999									

Приложение Б

Таблица

Значения распределения Стьюдента

<i>n</i>	<i>Доверительная вероятность Р</i>				
	<i>0,90</i>	<i>0,95</i>	<i>0,98</i>	<i>0,99</i>	<i>0,999</i>
2	6,31	12,71	31,82	63,68	636,62
3	2,92	4,30	6,97	9,93	31,60
4	2,35	3,18	4,54	5,84	12,92
5	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	2,02	2,57	3,37	4,06	6,87
7	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
∞	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

Приложение В

Таблица

Значения критерия Фишера для различных уровней значимости

k_2	F_q при k_1 равном									
	1	2	3	4	5	6	8	12	16	∞
	$q = 0,05$									
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,37	19,41	19,43	19,50
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,84	5,63
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,92	3,67
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,20	2,93
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,82	2,54
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,60	2,30
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,53	2,44	2,13
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,33	2,01
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,34	2,25	1,92
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,18	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,09	1,99	1,62
∞	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	1,94	1,75	1,64	4,00
	$q = 0,01$									
2	98,49	99,00	99,17	99,25	99,30	99,33	99,36	99,12	99,44	99,50
4	21,20	18,00	16,69	15,98	15,52	15,21	14,80	14,37	14,15	13,46
6	13,74	10,92	9,78	9,15	8,75	8,47	8,10	7,72	7,52	6,88
8	11,26	8,65	7,59	7,01	6,63	6,37	6,03	5,67	5,48	4,86
10	10,04	7,56	6,55	5,99	5,64	5,39	5,06	4,71	4,52	3,91
12	9,33	6,93	5,95	5,41	5,06	4,82	4,50	4,16	3,98	3,36
14	8,86	6,51	5,56	5,03	4,69	4,46	4,14	3,80	3,62	3,00
16	8,53	6,23	5,29	4,77	4,44	4,20	3,89	3,55	3,37	2,75
18	8,28	6,01	5,09	4,58	4,25	4,01	3,71	3,37	3,20	2,57
20	8,10	5,85	4,94	4,43	4,10	3,87	3,50	3,23	3,05	2,42
30	7,56	5,39	4,51	4,02	3,70	3,47	3,17	2,84	2,66	2,01
∞	6,64	4,60	3,78	3,32	3,02	2,80	2,51	2,18	1,99	1,00

Примечание: k_1 – число степеней свободы большей дисперсии;
 k_2 – число степеней свободы меньшей дисперсии.

Учебное издание

Крапивина Елена Сергеевна
Садовников Игорь Владимирович

МЕТРОЛОГИЯ

Часть 1

Редактор Л. П. Усова
Вёрстка Н. Ю. Добрецкой

Подписано в печать 27.12.2017.
Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Способ печати цифровой.
Усл. печ. л. 10,2. Уч.-изд. л. 5,9.
Заказ № 17250. Тираж 100 экз.
(1-й з-д 1–34 экз.)

ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
672039, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30