

М.Я. Марусина

В.Л. Ткалич

Е.А. Воронцов

Н.Д. Скалецкая

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ СТАНДАРТИЗАЦИИ И СЕРТИФИКАЦИИ



Санкт-Петербург
2009

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

**М.Я. Марусина, В.Л. Ткалич,
Е.А. Воронцов, Н.Д. Скалецкая**

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ, СТАНДАРТИЗАЦИИ И СЕРТИФИКАЦИИ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2009

Марусина М.Я., Ткалич В.Л., Воронцов Е.А., Скалецкая Н.Д. «Основы метрологии, стандартизации и сертификации». Учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 164 с.

В учебном пособии рассмотрены основные термины и определения метрологии, системы физических величин и единиц, теория погрешностей, вопросы обработки результатов измерений. Уделено внимание проблемам единства измерений и эталонам единиц физических величин, видам, методам и средствам измерений. Две главы пособия посвящены основам стандартизации и сертификации.

Предназначено для студентов факультета точной механики и технологий в рамках дисциплины общепрофессионального цикла ОПД.Ф.05 «Метрология, стандартизация и сертификация» учебного плана подготовки бакалавров по направлению 200100 «Приборостроение» и дипломированных специалистов по специальностям 200101 «Приборостроение», 200107 «Технология приборостроения», 220401 «Мехатроника», 230104 «Системы автоматизированного проектирования».

Печатается по решению Совета факультета ТМиТ СПбГУИТМО от 14.10.08 (протокол №2).



В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

©Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2009

© М.Я. Марусина,
В.Л. Ткалич,
Е.А. Воронцов,
Н.Д. Скалецкая
2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИИ. СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ЕДИНИЦ	8
1.1. Предмет метрологии	8
1.2. Физические свойства и величины	10
1.2.1. Качественная характеристика измеряемых величин.....	10
1.2.2. Количественная характеристика измеряемых величин	12
1.3. Измерительные шкалы.....	13
1.3.1. Способы получения измерительной информации.....	13
1.3.2. Неметрические шкалы	15
1.3.3. Метрические шкалы.....	19
1.4. Системы физических величин и единиц. Международная система единиц (система СИ)	23
1.5. Контрольные вопросы	28
РАЗДЕЛ 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ.....	30
2.1. Классификация погрешностей.....	30
2.2. Погрешность и неопределенность.....	35
2.3. Правила округления результатов измерений	37
2.4. Контрольные вопросы	38
РАЗДЕЛ 3. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ	39
3.1. Систематические погрешности и их классификация	39
3.2. Способы обнаружения и устранения систематических погрешностей.....	42
3.3. Контрольные вопросы	48
РАЗДЕЛ 4. СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ.....	50
4.1. Вероятностное описание случайных погрешностей	50
4.2. Числовые параметры законов распределения. Центр распределения. Моменты распределений	55
4.3. Оценка результата измерения.....	59
4.4. Характеристики нормального распределения.....	61
4.5. Оценка случайных погрешностей. Доверительная вероятность и доверительный интервал	64
4.6. Грубые погрешности и методы их исключения.....	69
4.7. Обработка результатов прямых многократных измерений	72
4.8. Контрольные вопросы	76

РАЗДЕЛ 5. ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ. ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	78
5.1. Воспроизведение единиц физических величин и передача их размеров. Единство измерений	78
5.2. Эталоны единиц физических величин	79
5.2.1. Классификация эталонов.....	79
5.2.2. Примеры построения эталонов основных единиц.....	86
5.2.3. Поверочные схемы	92
5.3. Основы техники измерений	93
5.3.1. Виды измерений	93
5.3.2. Методы измерений.....	96
5.4. Контрольные вопросы	99
РАЗДЕЛ 6. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ.....	100
6.1. Понятие о средстве измерений	100
6.2. Классификация средств измерений.....	103
6.3. Метрологические характеристики средств измерений и их нормирование	105
6.4. Классы точности средств измерений	107
6.5 Надежность средств измерений.....	112
6.5.1. Основные понятия теории метрологической надежности.....	112
6.5.2. Изменение метрологических характеристик средств измерений в процессе эксплуатации	115
6.5.3. Показатели метрологической надежности средств измерений.....	117
6.5.4. Метрологическая надежность и межповерочные интервалы	121
6.6. Контрольные вопросы	123
РАЗДЕЛ 7. ОСНОВЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ.....	124
7.1. Цели и задачи.....	124
7.2. Методы и формы стандартизации	127
7.3. Нормативные документы по стандартизации в РФ.....	129
7.3.1. Виды стандартов	132
7.4. Международная стандартизация	133
7.5. Правовые основы, задачи и организация государственного надзора в области стандартизации	135
7.6. Контрольные вопросы	138
РАЗДЕЛ 8. ОСНОВЫ СЕРИФИКАЦИИ.....	139
8.1. Цели и объекты сертификации	139
8.2. Органы сертификации	141
8.3. Системы сертификации	142
8.4. Аккредитация испытательных лабораторий	143
8.5. Основы квалиметрии	145

8.5.1. Качество продукции.....	145
8.5.2. Объективные методы определения показателей качества.....	147
8.5.3. Эвристические методы определения показателей качества.....	148
8.5.3.1. Экспертный метод оценки качества продукции.....	149
8.6. Контрольные вопросы	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
ПРИЛОЖЕНИЕ	
Список основных государственных стандартов и нормативных документов в области метрологии.....	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	160

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие разработано в рамках общепрофессиональной дисциплины ОПД.Ф.05 «Метрология, стандартизация и сертификация» учебного плана по ряду направлений подготовки дипломированных специалистов и направлений подготовки бакалавров и магистров в соответствии с требованиями Государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования.

Задачей дисциплины является формирование у студентов достаточных знаний в области основ метрологии, стандартизации и сертификации, позволяющих использовать современные измерительные технологии, которые представляют собой последовательность действий, направленных на получение измерительной информации требуемого качества.

Измерения – один из важнейших путей познания природы человеком. Они играют огромную роль в современном обществе. Наука, техника и промышленность не могут существовать без них. 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.

Диапазон измеряемых величин и их количество постоянно растет. Так, например, длина измеряется в диапазоне от 10^{-10} м до 10^{17} м, температура – от 0,5 К до 10^6 К, электрическое сопротивление – от 10^{-6} Ом до 10^{17} Ом, сила электрического тока – от 10^{-16} А до 10^4 А, мощность – от 10^{-15} Вт до 10^9 Вт. С ростом диапазона измеряемых величин возрастает и сложность измерений. Они, по сути дела, перестали быть одноактным действием и превратились в сложную процедуру подготовки и проведения измерительного эксперимента, обработки и интерпретации полученной информации. Поэтому следует говорить об измерительных технологиях, понимаемых как последовательность действий, направленных на получение измерительной информации требуемого качества.

Другой фактор, подтверждающий важность измерений, – их значимость. Основой любой формы управления, анализа, прогнозирования, планирования контроля или регулирования является достоверная исходная информация, которая может быть получена только путем измерения требуемых ФВ, параметров и показателей. Естественно, что только высокая и гарантированная точность результатов измерений обеспечивает правильность принимаемых решений.

Сотрудничество с зарубежными странами, совместная разработка научно-технических программ требуют взаимного доверия к

измерительной информации. Ее высокое качество, точность и достоверность, единообразие принципов и способов оценки точности результатов измерений имеют первостепенное значение.

Метрологии посвящено много публикаций, основную массу которых составляют научно-технические труды, освещающие отдельные вопросы теории измерений. Среди лучших работ такого плана следует отметить работы Г.Д. Бурдуна и Б.Н. Маркова [1], В.А. Грановского [4], М.А. Земельмана [7], В.П. Короткова и Б.А. Тайца [10], П.В. Новицкого и И.А. Зографа [17, 18], С.Г. Рабиновича [22], Шишкина И.Ф. [32, 33].

Данное учебное пособие состоит из восьми разделов. Первый раздел посвящен основным терминам и определениям метрологии и системам физических величин и единиц. Во втором разделе представлены основные понятия теории погрешностей, приведена классификация погрешностей. Систематическим и случайным погрешностям посвящены третий и четвертый разделы. В пятом разделе рассмотрены вопросы единства измерений и эталоны единиц ФВ. Классификация средств измерений их метрологические характеристики, классы точности, а также основы теории надежности СИ раскрыты в шестом разделе. Основы стандартизации и сертификации представлены в седьмом и восьмом разделах учебного пособия.

В пособии использованы новые метрологические термины и определения, введенные с января 2001 г. В доступной форме изложены теоретические положения метрологии, в конце каждого раздела для самопроверки приведены контрольные вопросы.

Список используемых сокращений

ИС	измерительный сигнал
ИСО	Международная организация по стандартизации
ИУ	измерительное устройство
МБМВ	Международное бюро мер и весов
МКМВ	Международный комитет мер и весов
ММ	математическая модель
МНК	метод наименьших квадратов
МО	метрологическое обеспечение или математическое ожидание
МОЗМ	Международная организация законодательной метрологии
МС	Метрологическая служба
МХ	Метрологические характеристики
МЭК	Международная электротехническая комиссия
СИ	средство измерений; в сочетании "система СИ" данное сокращение означает "система интернациональная"
СКО	среднее квадратическое отклонение
ФВ	физическая величина
ЧЭ	чувствительный элемент

РАЗДЕЛ 1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИИ. СИСТЕМЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ЕДИНИЦ

1.1. Предмет метрологии

Метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Такое определение дано в Рекомендациях РМГ 29–99 [24], устанавливающих основные термины и определения понятий в области метрологии. Рекомендации по межгосударственной стандартизации введены в действие в качестве Рекомендаций по метрологии Российской Федерации с 1 января 2001 года взамен ГОСТ 16263-70.

Основное понятие метрологии – измерение. Получение количественной информации о характеристиках свойств объектов и явлений окружающего мира опытным путём (т.е. экспериментально) называется измерением. В отличие от количественной информации, получаемой теоретическим путём, т.е. посредством вычислений и расчётов, такая информация называется измерительной.

Во время измерений проявляются некоторые объективные законы природы. Кроме того, при получении измерительной информации должны соблюдаться определённые правила и нормы, устанавливаемые законодательным путём. Всё это составляет предмет науки об измерениях – метрологии (от др.-греч. *metron* – мера и *logos* – речь, слово, учение или наука). 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» [33].

Предметом метрологии является извлечение измерительной информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью. Средства метрологии – это совокупность средств измерений и метрологических стандартов, обеспечивающих их рациональное использование.

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 (рис.1.1.).

Законодательная метрология – раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, мето-

дов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимой точности измерений в интересах общества.



Рис. 1.1. Структура теоретической метрологии

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

1.2. Физические свойства и величины

Все объекты окружающего мира характеризуются своими свойствами. *Свойство* – философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления, процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (явлениями, процессами) и обнаруживается в его отношениях к ним. Свойство – категория качественная. Для количественного описания различных свойств процессов и физических тел вводится понятие величины. *Величина* – это свойство чего-либо, которое может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. Величина не существует сама по себе, имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной.

Анализ величин позволяет разделить их на два вида: величины материального вида (реальные) и величины идеальных моделей реальности (идеальные), которые относятся главным образом к математике и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий.

Реальные величины, в свою очередь, делятся на физические и нефизические. Физическая величина в самом общем случае может быть определена как величина, свойственная материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных (физика, химия) и технических науках. К нефизическим величинам следует отнести величины, присущие общественным (нефизическим) наукам – философии, социологии, экономике и т.п.

Объектами измерений являются физические величины (ФВ). Документ РМГ 29-99 [24] трактует **физическую величину** как одно из свойств физического объекта, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них. Индивидуальность в количественном отношении понимают в том смысле, что свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого. Так, все тела обладают массой и температурой, но у каждого из них они различны в количественном отношении.

1.2.1. Качественная характеристика измеряемых величин

Формализованным отражением качественного различия между измеряемыми физическими величинами служит их *размерность*. Размерность обозначается символом *dim*, происходящим от слова *dimension*.

Размерность физической величины $dim Q$ – выражение в форме степенного многочлена, составленного из произведений символов основных

физических величин в различных степенях и отражающее связь данной ФВ с ФВ, принятыми в данной системе за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1: $\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\eta \mathbf{K}$, где $L, M, T, I \dots$ – размерности соответствующих основных ФВ; $\alpha, \beta, \gamma, \eta \dots$ – показателем размерности. Каждый из показателей размерности может быть положительным или отрицательным, целым или дробным числом, нулём. Если все показатели размерности равны нулю, то такую величину называют *безразмерной*. Она может быть относительной, определяемой как отношение одноимённых величин (например, относительная диэлектрическая проницаемость), или логарифмической, определяемой как логарифм относительной величины (например, логарифм отношения мощностей или напряжений).

При определении размерности производных ФВ руководствуются следующими правилами [32]:

1. Размерности левой и правой частей уравнения равны между собой.
2. Алгебра размерностей мультипликативна, т.е. состоит всего лишь из двух действий – умножения и деления.
3. Размерность произведения нескольких величин равна произведению их размерностей. Так, если зависимость между величинами имеет вид $Q = A \cdot B \cdot C$, то

$$\dim Q = \dim A \cdot \dim B \cdot \dim C.$$

4. Размерность частного при делении одной величины на другую равна отношению их размерностей, т.е. если $Q = \frac{A}{B}$, то

$$\dim Q = \frac{\dim A}{\dim B}.$$

5. Размерность любой величины, возведенной в степень, равна её размерности в той же степени. Так, если $Q = A^n$, то

$$\dim Q = \prod_1^n \dim A = \dim^n A.$$

Размерность является качественной характеристикой измеряемой величины. Она отражает её связь с основными ФВ 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-нибудь предмета». По этой причине во многих гуманитарных науках, где номенклатура и связь основных и производных измеряемых величин ещё не определены, теория размерностей не находит пока эффективного применения. В физике, напротив, методами теории размерностей удается получать важные самостоятельные результаты. Применение анализа симметрий размерностей физических величин позволяет иногда определить неизвестную зависимость между ФВ. Эта проблема достаточно подробно рассмотрена в монографии [16].

1.2.2. Количественная характеристика измеряемых величин

Для того чтобы можно было установить для каждого объекта различия в количественном содержании свойства, отображаемого физической величиной, в метрологии введены понятия ее размера и значения.

Количественной характеристикой любого свойства служит *размер*.

Размер физической величины – это ее количественная определенность, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу. Например, каждое тело обладает определенной массой, вследствие чего тела можно различать по их массе, т.е. по размеру интересующей нас ФВ.

Размер является объективной количественной характеристикой, не зависящей от выбора единиц измерений. Например, 1000 мг; 1 г; 0,001 кг – три варианта представления одного и того же размера. Каждый из них является *значением* физической величины (в данном случае – массы) – выражением размера в тех или иных единицах измерений.

Значение физической величины – это выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Значение физической величины Q можно представить в виде произведения:

$$Q = q[Q], \quad (1.1)$$

где q – отвлечённое число, называемое *числовым значением*, а $[Q]$ – *размер единицы* измерения данной ФВ. Значение ФВ находится путем измерения или вычисления в соответствии с *основным уравнением измерения* (1.1). Из приведённых примеров видно, что значение, как и размер, от выбора единиц не зависит, в отличие от числового значения. Для одного и того же размера числовое значение тем меньше, чем больше единица измерения (и наоборот), так что произведение в правой части основного уравнения измерения (1.1) остается постоянным.

Единица физической величины – это ФВ фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице. Она применяется для количественного выражения однородных ФВ.

Размер единицы физической величины – количественная определенность единицы физической величины, воспроизводимой или хранимой средством измерений.

Не следует для выражения количественных соотношений применять словосочетания типа «величина массы», «величина длины», т.к. масса и длина сами являются величинами. Не принято говорить «размер массы (длины, силы, ...)», «значение массы (длины, силы, ...)», говорят просто «масса (длина, сила, ...)».

Из-за зависимости числовых значений от размеров единиц ФВ, роль последних очень велика. Если допустить произвол в выборе единиц, то результаты измерений будут несопоставимы между собой, т.е. нарушится

единство измерений. Чтобы этого не произошло, единицы измерений устанавливаются по определённым правилам и закрепляются законодательным путём. Наличие законодательной метрологии отличает метрологию от других естественных наук (физики, химии и др.) и направлено на обеспечение *единства измерений*.

1.3. Измерительные шкалы

1.3.1. Способы получения измерительной информации

Согласно [24] *измерение физической величины* – это совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

В этом определении учтена техническая сторона (совокупность операций), раскрыта метрологическая суть измерений (сравнение с единицей) и показан гносеологический аспект (получение значения величины). В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая и не определена единица измерений этой величины) практикуется *оценивание* таких величин по условным шкалам.

Суть измерения заключается в *сравнении*. Не существует иного способа получения информации о размере ФВ, кроме как путем сравнения его с другим размером такой же физической величины, т.е. имеющей такую же размерность. *Измерение суть сравнение размеров опытным путем*. Сравнение размеров опытным путем является единственным способом получения измерительной информации. При этом не уточняется, каким образом происходит сравнение размеров одноименных физических величин, с помощью каких приспособлений или даже может быть без них. Просто утверждается, что другого способа нет.

Вариантов сравнения между собой двух размеров Q_i и Q_j всего три [33]:

$$Q_i > Q_j; \quad (1.2)$$

$$Q_i - Q_j = \Delta Q_{ij}; \quad (1.3)$$

$$\frac{Q_i}{Q_j} = x_{ij}. \quad (1.4)$$

Первый из них – самый простой. Экспериментальное решение неравенства (1.2) позволяет ответить на вопрос: какой из двух размеров больше другого (либо они равны), но ничего не говорит о том, *на сколько* больше, или *во сколько раз*. Это наименее информативное измерение. Однако более полная измерительная информация иногда даже не требуется. Так, например, на рис. 1.2. показан вариант сравнения массы двух изделий с помощью равноплечего коромысла. Результат измерения убедительно свиде-

тсльствует о том, что первое изделие тяжелее второго. В некоторых случаях этого вполне достаточно.

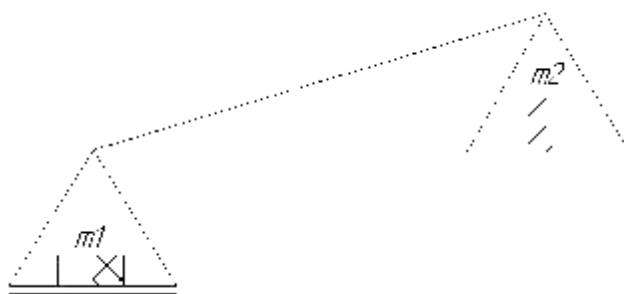


Рис. 1.2. Сравнение массы двух изделий

Более информативно сравнение по правилу (1.3). Оно позволяет получить ответ на вопрос о том, *на сколько* один размер больше или меньше другого (в частном случае они могут оказаться равными). Так, например, подсыпая песок на правую чашку весов (см. рис. 1.2.), можно добиться того, что коромысло уравнивается. Тогда можно будет сказать, что масса первого изделия больше массы второго на массу песка Δm в правой чашке. А вот сказать, *во сколько раз* больше, по-прежнему будет нельзя.

Для того, чтобы ответить на вопрос, *во сколько раз* один размер больше или меньше другого (в частном случае они могут оказаться и равными), нужно сравнить размеры между собой по правилу (1.4), т.е. посмотреть, сколько раз j -й размер укладывается в i -м. Это будет означать, что j -й размер выступает в качестве единицы измерения, а к единицам измерений предъявляются совершенно определённые требования. В частности, для обеспечения единства измерений они должны быть установлены по определённым правилам и закреплены законодательным путём. Следовательно, измерение по правилу (1.4) представляет собой сравнение неизвестного размера $Q_i = Q$ с узаконенной единицей измерения $Q_j = [Q]$, с целью определения числового значения q измеряемой физической величины, которое показывает, *во сколько раз* неизвестный размер больше размера единицы, или *на сколько* единиц он больше нуля.

Таким образом, последняя разновидность способа сравнения является самой информативной. Она позволяет определить *значение измеряемой физической величины* Q , т.е. выразить её размер в общепринятых (узаконенных) единицах в кратном или дольном отношении, и отвечает на вопрос, *во сколько раз* или *на сколько* (единиц) один размер больше (меньше) другого.

Измерение – познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента данной ФВ с известной ФВ, принятой за единицу измерения.

В практической деятельности необходимо проводить измерения различных величин, характеризующих свойства тел, веществ, явлений и процес-

сов. Некоторые свойства проявляются только качественно, другие – количественно. Многообразные проявления (количественные или качественные) любого свойства образуют множества, отображения элементов которых на упорядоченное множество чисел или в более общем случае условных знаков образуют *шкалы измерения* этих свойств. Шкала измерений количественного свойства является шкалой физической величины.

Шкала физической величины представляет собой упорядоченную совокупность значений этой величины, принятую по соглашению на основании результатов точных измерений.

Согласно теории измерений измерение трактуется как *отображение* элементов *эмпирической* системе с отношениями (совокупность объектов, их свойств и отношений) на элементы *абстрактной* системы с отношениями (совокупность оценок и правил их образования), осуществляемое по определенной системе *правил соотнесения* эмпирической и абстрактной систем (совокупность правил и процедур оценивания).

Совокупность правил, позволяющих выполнить такое сопоставление эмпирической системы отношений в числовую систему отношений, называется *шкалой*.

В соответствии с логической структурой проявления свойств в теории измерений различают пять основных типов шкал измерений: две – неметрические шкалы (шкала наименований и шкала порядка) и три – метрические шкалы (шкала интервалов, отношений и абсолютные шкалы).

1.3.2. Неметрические шкалы

Шкала наименований (шкала классификации). Такие шкалы используются для классификации эмпирических объектов, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности (совпадения или несовпадения). Эти свойства нельзя считать физическими величинами, поэтому шкалы такого вида не являются шкалами физических величин. Это самый простой тип шкал, основанный на приписывании качественным свойствам объектов чисел, играющих роль имен. Условные номера в качестве имен присваиваются по следующему правилу: нельзя присваивать одно имя (число) двум разным объектам. Поскольку числа характеризуются только отношениями эквивалентности, то в них отсутствует понятие нуля, «больше» или «меньше» и единицы измерения.

Номинальное измерение является *качественным* измерением. Единственный факт, существенный при номинальных измерениях, заключается в том, что одинаковым характеристикам, состояниям и явлениям присваиваются одни и те же метки, а различным характеристикам – разные. Сущностью такого измерения является безусловный смысл равенства и неравенства. Процедура присвоения ограничена лишь тем, что одно имя можно присвоить лишь одному объекту (классу).

Примером номинального измерения в технических науках служит целый класс измерений, осуществляемых системами обнаружения. Эти системы конструируются так, чтобы результат их действия был двоичным. Системы пожарной сигнализации вырабатывают сигнал «пожара нет», когда температура ниже определенного значения, и сигнал «пожар», когда температура превышает это значение. В этом случае отношение в эмпирической системе для номинального измерения – тождество. Номинальное измерение не может указать, какое из событий или явлений больше или меньше. Все, что можно определить, это «случилось» или «не случилось». Если число возможных исходов больше двух, то номинальное измерение может указать, какое именно событие произошло. Например, цвет любой вещи можно определить по названию подходящего цвета в атласе цветов, предназначенном для идентификации цвета.

Кроме того, с помощью номинального измерения осуществляют классификацию, которая существует во многих разновидностях: например, с помощью диагностических средств классифицируют болезнь, также классифицируют флору, фауну, проводят контроль изделий (классификация на годные и бракованные), осуществляют сложную процедуру распознавания образов и т.д. 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.

Шкала порядка (шкала рангов). Результат экспериментального решения неравенства (1.2) может быть представлен на *шкале порядка*, являющейся упорядоченной последовательностью опорных (*реперных*) точек, обозначаемых буквами, цифрами или символами и соответствующих размерам $Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4 \dots < Q_n$, о каждом из которых известно, что он больше предыдущего, но меньше последующего, хотя сами размеры неизвестны (рис. 1.3.). Шкала является монотонно изменяющейся и позволяет установить отношение «больше – меньше» между величинами, характеризующими это свойство. Если для обозначения реперных точек используются цифры, то они называются *баллами*. Обозначения нельзя ни складывать, ни вычитать, ни делить, ни перемножать.

На шкале порядка не определены никакие математические операции. В то же время, если один размер по шкале порядка меньше другого, а последний в свою очередь меньше третьего, то и первый размер меньше третьего. Т.е. для любых чисел a, b и c таких, что $a < b$ и $b < c$, справедливо соотношение $a < c$ (транзитивность). Эти свойства *транзитивности* означают, что на шкалах порядка определены (т.е. могут выполняться) *логические операции*.

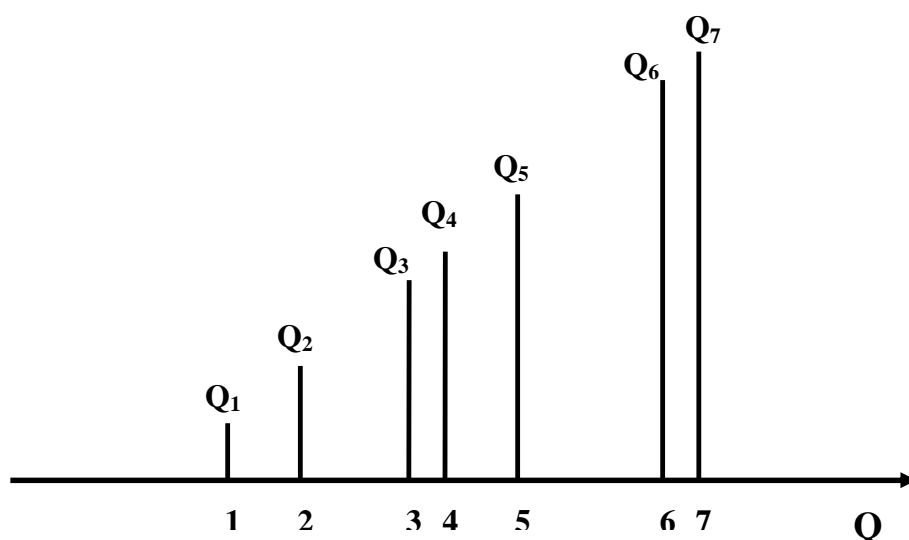


Рис. 1.3. Построение шкалы порядка

Так как размеры, которым соответствуют реперные точки, неизвестны, то бессмысленно говорить о масштабе на шкале порядка. По шкалам порядка не только нельзя определить, чему равен измеряемый размер Q_i , но и невозможно сказать, на сколько (или во сколько раз) он больше или меньше размера Q_j . В шкалах порядка принципиально невозможно ввести единицы измерения, так как для них не установлено отношение пропорциональности. Хотя нуль может и существовать.

Тем не менее, в областях, где к измерительной информации не предъявляются высокие требования, шкалы порядка применяются довольно широко. В промышленности, например, для измерений по шкалам порядка используются шаблоны. В образовательных учреждениях по шкале порядка измеряются знания учащихся (табл.1.1.):

Таблица 1.1.

Шкала оценок знаний учащихся

Российские оценки	ECTS	Смысловое содержание оценки
5	A	«отлично»
4	B	«очень хорошо»
	C	«хорошо»
3	D	«удовлетворительно»
	E	«посредственно»
2	FX	«неудовлетворительно» (с правом пересдать)
*	F	«неудовлетворительно» (без права пересдать)

При одномерной шкале порядок должен быть линейным: все объекты должны поддаваться выстраиванию в цепочку по какому-либо признаку (некоторые из них могут занять одно и то же место в цепочке – быть эквивалентными). Так, студенты после экзамена разбиваются на классы полу-

чивших оценки 2, 3, 4 и 5 в порядке роста их знаний, но для экзаменатора и внутри этих классов есть различия. Здесь существенно, что более знающему студенту присваивается большее число, и переставлять эти числа уже нельзя. Правда, можно договориться о другом порядке оценок, но это изменит всю систему. Так, суждения о студентах не изменились бы, если бы вместо оценок 2, 3, 4 и 5 ставились 5, 10, 20 и 35 (мог бы измениться средний балл, но это потому, что средний балл является так называемой неадекватной статистикой для шкалы порядка).

Группа допустимых преобразований для шкалы порядка должна уничтожать пропорциональность (ведь знания, оцененные на 4, нельзя считать вдвое более обширными или глубокими, чем знания, оцененные на 2) и отношение «быть суммой» (получить 2 и 3 – не то же, что получить 5), сохраняя лишь отношения большего и меньшего.

Итак, порядковое измерение занимает нижнюю ступень в *количественных* измерениях. Упорядочение в шкале порядка может осуществляться по внешним признакам – нумерация – или по внутренним свойствам – ранжирование. Пример первой процедуры – нумерация мест в театре, домов, исследуемых образцов, промышленных изделий и т.д. Примеры второй процедуры – ранжирование силы ветра (волнения) на море (12-балльная шкала Бофорта для силы морского ветра) (табл. 1.2), ранжирование силы землетрясений (шкала Рихтера), шкала вязкости Энглера, ранжирование твердости минералов (шкала Мооса).

Таблица 1.2.

Шкала Бофорта для измерения силы ветра

Балл	Название	Признак
0	Штиль	Дым идёт вертикально
1	Тихий	Дым идёт слегка наклонно
2	Лёгкий	Ощущается лицом, шелестят листья
3	Слабый	Развеваются флаги
4	Умеренный	Поднимается пыль
5	Свежий	Вызывает волны на воде
6	Сильный	Свистит в вантах, гудят провода
7	Крепкий	На волнах образуется пена
8	Очень крепкий	Трудно идти против ветра
9	Шторм	Срывает черепицу
10	Сильный шторм	Вырывает деревья с корнем
11	Жестокий шторм	Большие разрушения
12	Ураган	Опустошительное действие

Широкое распространение получили шкалы порядка с нанесенными на них реперными точками. К таким шкалам относится шкала Мооса для определения твердости минералов (табл. 1.3.). В ней определенным стан-

дартным минералам от талька до алмаза в порядке возрастания их твердости присвоены целые числа от 1 до 10.

Таблица 1.3.

Минералогическая шкала твердости

Балл	Твёрдость
0	Меньше твёрдости талька
1	Равна или больше твёрдости талька, но меньше твёрдости гипса
2	Равна или больше твёрдости гипса, но меньше твёрдости известкового шпата
3	Равна или больше твёрдости известкового шпата, но меньше твёрдости плавикового шпата
4	Равна или больше твёрдости плавикового шпата, но меньше твёрдости апатита
5	Равна или больше твёрдости апатита, но меньше твёрдости полевого шпата
6	Равна или больше твёрдости полевого шпата, но меньше твёрдости кварца
7	Равна или больше твёрдости кварца, но меньше твёрдости топаза
8	Равна или больше твёрдости топаза, но меньше твёрдости корунда
9	Равна или больше твёрдости корунда, но меньше твёрдости алмаза
10	Равна твёрдости алмаза или больше её

Определение значений величин с помощью шкал порядка нельзя считать измерениями, так как на них отсутствуют единицы измерения. Операцию по приписыванию числа требуемой величине следует считать оцениванием. Оценивание по шкалам порядка является неоднозначным и весьма условным.

1.3.3. Метрические шкалы

Шкала интервалов (шкала разностей). Данные шкалы являются дальнейшим развитием шкал порядка и относятся уже к метрическим шкалам. Шкала состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу измерения и произвольно выбранное начало – нулевую точку. На шкалах интервалов по сравнению с неметрическими шкалами установлен *масштаб*.

Шкала интервалов представляет собой результат экспериментального сравнения i -го размера с j -м, проведенный по правилу (1.3). Пример построения шкалы интервалов приведён на рис. 1.4., где в качестве j -го размера выбран третий. Если бы для сравнения были выбраны четвертый или пятый размеры, то нуль сместился бы выше по шкале интервалов; если бы второй или первый – ниже.

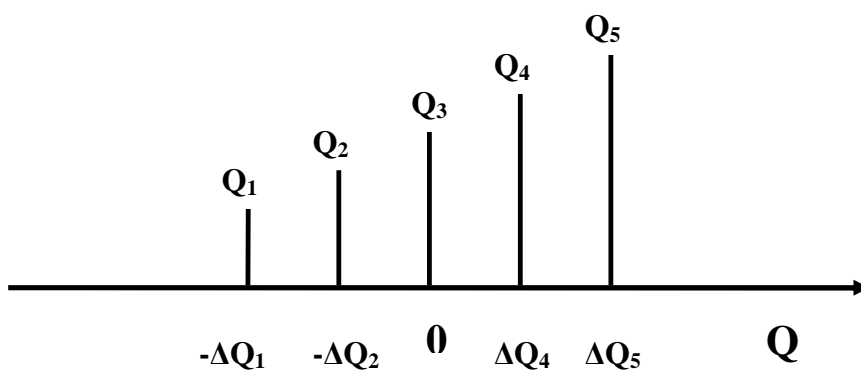


Рис. 1.4. Построение шкалы интервалов

Таким образом, начало отсчёта на шкале интервалов не определено и зависит от выбора размера, с которым производится сравнение. Для обеспечения единства измерений этот размер должен быть общепринятым или установленным законодательно.

Шкала интервалов величины Q описывается уравнением $Q = Q_0 + q[Q]$, где q – числовое значение величины; Q_0 – начало отсчета шкалы; $[Q]$ – единица данной величины. Такая шкала полностью определяется заданием начала отсчета Q_0 и единицы данной величины $[Q]$. Выбираются два размера Q_0 и Q_1 величины, которые относительно просто реализованы физически в наиболее чистом виде. Эти размеры называются опорными точками, или основными реперами, а интервал $(Q_1 - Q_0)$ – основным интервалом. Точка Q_0 принимается за начало отсчета, а величина $(Q_1 - Q_0)/n = [Q]$ за единицу Q . При этом n выбирается таким, чтобы $[Q]$ было целой величиной.

Перевод одной шкалы интервалов $Q = Q_{01} + q_1[Q]_1$ в другую $Q = Q_{02} + q_2[Q]_2$ проводится по формуле:

$$q_2 = \frac{(q_1 - (Q_{02} - Q_{01})/[Q]_1)[Q]_1}{[Q]_2}.$$

К шкалам интервалов относится летоисчисление по различным календарям, в которых за начало отсчета принято либо сотворение мира (юлианский календарь), либо рождество Христово (григорианский календарь). Температурные шкалы также являются шкалами интервалов. Так, например, по температурным шкалам Цельсия и Реомюра первая опорная точка или начало отсчета – температура таяния льда, по шкале Фаренгейта – температура смеси льда с солью и нашатырём, по шкале Кельвина – температура, при которой прекращается тепловое движение молекул (рис. 1.5.).

Второй опорной точкой на трёх температурных шкалах (Цельсия, Реомюра, Фаренгейта) является температура кипения воды при номинальном значении атмосферного давления.

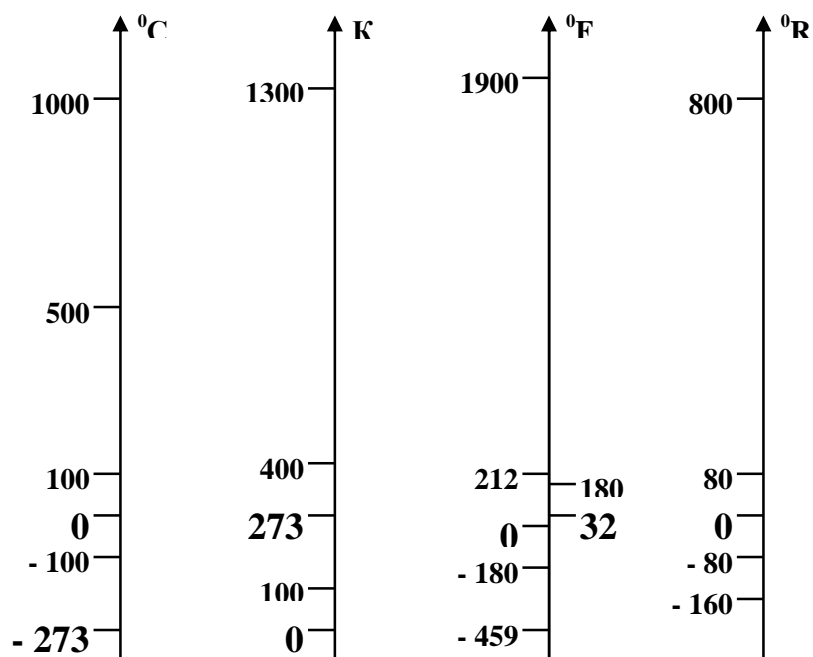


Рис. 1.5. Температурные шкалы Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), Кельвина ($^{\circ}\text{K}$), Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) и Реомюра ($^{\circ}\text{R}$)

На шкале Цельсия интервал между опорными точками разбит на 100 градаций – *градусов*; на шкале Реомюра – на 80; на шкале Фаренгейта – на 180. При этом на шкале Фаренгейта, по сравнению с предыдущими шкалами, начало отсчёта сдвинуто на 32°F в сторону низких температур (т.е. на шкале Фаренгейта температура таящего льда соответствует $+32^{\circ}\text{F}$, а температура кипящей воды составляет $+212^{\circ}\text{F}$, температура человеческого тела $+96^{\circ}\text{F}$). Таким образом, единицы измерения температуры в шкале Цельсия и Фаренгейта различаются. Градус Фаренгейта в 1,8 раза меньше градуса Цельсия. Шкалой Фаренгейта до настоящего времени пользуются в США. Пересчет значения температуры из одной шкалы в другую осуществляется по формуле:

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

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

На шкале Кельвина в качестве второй опорной точки выбрана температура таяния льда, а интервал между реперными точками разбит на 273,16 частей с тем, чтобы одна такая часть, называемая Кельвином, в точности равнялась 1°C ($1^{\circ}\text{C} = 1^{\circ}\text{K}$). Это значительно упрощает переход от одной шкалы к другой.

Градации являются единицами измерений *интервалов* между размерами, но не самих размеров физических величин. В качестве градаций могут использоваться и узаконенные единицы измерений физических величин. Выражение интервала в тех или иных единицах измерений называется его *значением*. Интервалы можно сравнивать между собой двумя способами, во-первых, по принципу, *на сколько* один интервал больше или меньше

другого, во-вторых, по принципу – *во сколько раз*. Что же касается размеров физических величин, то по шкале порядка можно получить только информацию о том, на сколько один размер больше или меньше другого. Если, например, второй размер больше первого на семь градаций, а третий меньше второго на две, то первый меньше третьего на пять градаций.

На шкале интервалов определены только аддитивные математические операции. Получить информацию о том, *во сколько раз* один размер больше другого, по шкале интервалов невозможно. Для этого нужно знать сами размеры, сведений о которых на шкале интервалов нет.

Шкала отношений. *Шкала отношений* служит для представления результатов измерений, полученных посредством экспериментального сравнения i -го размера с j -м по правилу (1.4).

В этих 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 отсчета. К значениям, полученным по шкале отношений, применимы все арифметические действия, что имеет важное значение при измерении физических величин. Шкалы отношений являются самыми совершенными. Они описываются уравнением $Q = q[Q]$, где Q – физическая величина, для которой строится шкала, $[Q]$ – ее единица измерения, q – числовое значение физической величины.

Шкалы отношений являются самыми совершенными, самыми информативными и самыми распространёнными. На них представлена информация о самих размерах физических величин, в частности – об их значениях. Это позволяет решать и на сколько, и во сколько раз один размер больше или меньше другого.

На шкалах отношений определены любые математические операции.

Переход от одной шкалы отношений к другой происходит в соответствии с уравнением

$$q_2 = \frac{q_1 [Q]_1}{[Q]_2}$$

Абсолютные шкалы. Процесс ужесточения (усиления) шкал приводит к понятию *абсолютной* шкалы, которая устанавливает однозначное (единственно возможное) соответствие между объектами и числами. Иначе говоря, абсолютные шкалы обладают всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеют естественное однозначное определение единицы измерения и соответственно не зависят от принятой системы единиц измерения.

Абсолютная шкала может использоваться для измерения *относительных величин*. Действительно, такие величины, как коэффициент усиления или затухания, коэффициент трения, коэффициент полезного действия, добротность колебательной системы, вероятность, относительная частота

появления события в серии испытаний и т. п., выражаются отвлеченными числами, не зависящими от выбора единиц, а при измерении этих величин не требуется эталонов. Свойствами относительных величин обладают также геометрические и фазовые углы. Относительные величины 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}).

Особый интерес представляет группа величин с ограниченными шкалами (такие, как коэффициент полезного действия, вероятность). Их значения могут находиться только в пределах от 0 до 1, причем конечные точки этого диапазона физически как бы бесконечно удалены, недостижимы (на практике это обстоятельство вынуждает перейти 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 берется логарифмическая величина для отношения двух «силовых» величин (напряжения, силы тока, давления, напряженности 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.

1.4. Системы физических величин и единиц. Международная система единиц (система СИ)

По степени условной независимости от других величин данной группы ФВ делятся на *основные* (условно независимые), *производные* (условно зависимые) и *дополнительные*. Основные величины выбираются обосновано, но в общем произвольным образом. Производные величины выражаются через основные на основе известных уравнений связи между ними.

Совокупность основных и производных единиц ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами, называется *системой единиц ФВ*. Единица основной ФВ в данной системе является *основной единицей системы*.

Действующая в настоящее время «Международная система единиц» (сокращенное обозначение система СИ (SI) «система интернациональная»)

была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. Система СИ – единственная система единиц ФВ, которая принята и используется в большинстве стран мира. Система СИ состоит из 7 основных, 2 дополнительных и ряда производных единиц. Наименования основных и дополнительных единиц ФВ приведены в таблице 1.4.

На территории нашей страны система единиц СИ действует с 1 января 1982 г. в соответствии с ГОСТ 8.417–81 «ГСИ. Единицы физических величин». Она возникла не на пустом месте и является логическим развитием предшествовавших ей систем единиц: СГС (основные единицы: сантиметр – грамм – секунда), МКГСС (основные единицы: метр – килограмм-сила – секунда), МКС (основные единицы: метр – килограмм – секунда) и др.

Таблица 1.4

Основные и дополнительные единицы ФВ системы СИ

№ п/п	Физическая величина			Единица измерения ФВ		
	Наименование	Размерность	Рекомендуемое обозначение	Наименование	Обозначение	
					русское	международное
О с н о в н ы е						
1	Длина	L	<i>l</i>	метр	м	m
2	Масса	M	<i>m</i>	килограмм	кг	kg
3	Время	T	<i>t</i>	секунда	с	s
4	Сила электрического тока	I	<i>I</i>	ампер	A	A
5	Термодинамическая температура	Θ	T	кельвин	K	K
6	Количество вещества	N	<i>n, ν</i>	моль	моль	mol
7	Сила света	J	<i>J</i>	кандела	кд	cd
Д о п о л н и т е л ь н ы е						
8	Плоский угол	–	–	радиан	рад	rad
9	Телесный угол	–	–	стерадиан	ср	sr

В названии системы ФВ применяют символы величин, принятых за основные. Например, система величин механики, в которой в качестве основных используются длина (L), масса (M) и время (T), называется системой LMT. Действующая международная система единиц СИ должна обозначаться символами LMTIΘNJ, обозначающими соответственно символы основных величин: длины (L), массы (M) и времени (T), силы электрического тока (I), температуры (Θ), количества вещества (N) и силы света (J).

Производная единица системы единиц – это единица производной ФВ системы единиц, образованная в соответствии с уравнением, связывающим ее с основными единицами или же с основными и уже определенными

производными единицами. Производные единицы системы СИ, имеющие специальное название, приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Производные единицы системы СИ, имеющие специальное название

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	Выражение через единицы СИ
Частота	T^{-1}	герц	Гц	s^{-1}
Сила, вес	$LM T^{-2}$	ньютон	Н	$mkgs^{-2}$
Давление, механическое напряжение	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Па	$m^{-1}kgs^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	джоуль	Дж	m^2kgs^{-2}
Мощность	L^2MT^{-3}	ватт	Вт	m^2kgs^{-3}
Количество электричества	TI	кулон	Кл	sA
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	В	$m^2kgs^{-3}A^{-1}$
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	Ф	$m^{-2}kg^{-1}s^4A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ом	$m^2kgs^{-3}A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сименс	См	$m^{-2}kg^{-1}s^3A^2$
Поток магнитной индукции	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Вб	$m^2kgs^{-2}A^{-1}$
Магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	Тл	$kgs^{-2}A^{-1}$
Индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	Гн	$m^2kgs^{-2}A^{-2}$
Световой поток	J	люмен	лм	$cdsr$
Освещенность	$L^{-2}J$	люкс	лк	$m^{-2}cdsr$
Активность радионуклида	T^{-1}	беккерель	Бк	s^{-1}
Поглощенная доза ионизирующего излучения	L^2T^{-2}	грей	Гр	m^2s^{-2}
Эквивалентная доза излучения	L^2T^{-2}	зиверт	Зв	m^2s^{-2}

Производные единицы бывают когерентными и некогерентными. *Когерентной* называется производная единица ФВ, связанная с другими едини-

цами системы уравнением, в котором числовой коэффициент принят равным 1.

Различают кратные и дольные единицы ФВ. *Кратная единица* – это единица ФВ, в целое число раз большая системной или внесистемной единицы. *Дольная единица* – единица ФВ, в целое число раз меньшая системной или внесистемной единицы. Приставки для образования кратных и дольных единиц СИ приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение приставки		Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское			международное	русское
10^{18}	экса	E	Э	10^{-1}	деци	d	д
10^{15}	пета	P	П	10^{-2}	санتي	c	с
10^{12}	тера	T	Т	10^{-3}	милли	m	м
10^9	гига	G	Г	10^{-6}	микро	μ	мк
10^6	мега	M	М	10^{-9}	нано	n	н
10^3	кило	k	к	10^{-12}	пико	p	п
10^2	гекто	h	г	10^{-15}	фемто	f	ф
10^1	дека	Da	да	10^{-18}	атто	a	а

Единицы ФВ делятся на системные и внесистемные. *Системная единица* – единица ФВ, входящая в одну из принятых систем. Все основные, производные, кратные и дольные единицы являются системными. *Внесистемная единица* – это единица ФВ, не входящая ни в одну из принятых систем единиц. Внесистемные единицы разделяют на четыре вида:

1. Допускаемые наравне с единицами СИ, например: единица массы – тонна; единицы плоского угла – градус, минута, секунда; единица объема – литр и др. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ, приведены в таблице 1.7.
2. Допускаемые к применению в специальных областях, к которым относятся: единицы длины (в астрономии) – астрономическая единица, парсек, световой год; единица оптической силы (в оптике) – диоптрия; единица энергии (в физике) – электрон-вольт, приведены в таблице 1.4.
3. Временно допускаемые к применению наравне с единицами СИ, например: в морской навигации – морская миля; в ювелирном деле единица массы – карат и др. Эти единицы должны изыматься из употребления в соответствии с международными соглашениями.

4. Изъятые из употребления, к ним относятся единицы давления – миллиметр ртутного столба; единица мощности – лошадиная сила и др., приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.7

Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Масса	тонна	t	т	10^3 кг
	атомная единица массы	u	а.е.м.	$\approx 1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг
Время	минута	min	мин	60 с
	час	h	ч	3600 с
	сутки	d	сут	86400 с
Плоский угол	градус	К°	К°	$(\pi/180)$ рад= $= 1,745329\mathbf{K} \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	К'	К'	$(\pi/10800)$ рад= $= 2,90888\mathbf{K} \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	К''	К''	$(\pi/648000)$ рад= $= 4,848137\mathbf{K} \cdot 10^{-6}$ рад
	град или гон	К^Д	град	$(\pi/200)$ рад
Объем, вместимость	литр	l	л	10^{-3} м^3
Длина	астрономическая единица	ua	а.е.	$\approx 1,45598 \cdot 10^{11}$ м
	световой год	ly	св.год	$\approx 9,4605 \cdot 10^{15}$ м
	парсек	pc	пк	$\approx 3,0857 \cdot 10^{16}$ м
Площадь	гектар	ha	га	10^4 м^2
Температура	градус Цельсия	К°С	К°С	$1^\circ\text{C} = 273,16 \text{ К}$
Оптическая сила	диоптрия	–	дптр	1 м^{-1}
Механическое напряжение	ньютон на квадратный миллиметр	N/mm^2	Н/мм^2	1МПа
Энергия	электрон-вольт	eV	эВ	$\approx 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж
Полная мощность	вольт-ампер	VA	ВА	
Реактивная мощность	вар	var	вар	

Таблица 1.8

Внесистемные единицы, изъятые из употребления,
и их связь с единицами системы СИ

Наименование величины	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Длина	микрон	мк	$1 \text{ мк} = 10^{-6} \text{ м}$
	ангстрем	Å	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$
Масса	центнер	цн	$1 \text{ цн} = 10^2 \text{ кг}$
Площадь	ар	а	$1 \text{ а} = 10^2 \text{ м}^2$
Сила	килограмм-сила	кгс	$1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н}$
	тонна-сила	тс	$1 \text{ тс} = 9,80665 \cdot 10^3 \text{ Н}$
	дина	дин	$1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н}$
Работа и энергия	килограмм-сила-метр	кгс·м	$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,80665 \text{ Дж}$
	эрг	эрг	$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$
	ватт·час	вт·ч	$1 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}$
Мощность	лошадиная сила	л.с.	$1 \text{ л.с.} = 735,499 \text{ Вт}$
Давление	бар	бар	$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$
	Миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.	$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$
	Миллиметр водяного столба	мм вод. ст.	$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па}$
	Техническая атмосфера	ат	$1 \text{ ат} = 9,80665 \cdot 10^4 \text{ Па}$
	Физическая атмосфера	атм	$1 \text{ атм} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (760 мм рт. ст.)
Угол поворота	оборот	об	$1 \text{ об} = 2\pi \text{ рад}$
Угловая скорость	оборот в минуту	об/мин	$1 \text{ об/мин} = \frac{\pi}{30} \text{ рад/с}$
	оборот в секунду	об/с	$1 \text{ об/с} = 2\pi \text{ рад/с}$

1.5. Контрольные вопросы

1. Определите основное понятие и предмет метрологии.
2. Укажите три раздела 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 физической величины?
6. Что является количественной характеристикой физической величины?
7. Используя основное уравнение измерения, объясните, почему значение физической величины не зависит от выбора единиц измерений?
8. В чем заключается суть измерения?
9. Поясните суть и отличия возможных способов сравнения между собой двух размеров Q_i и Q_j : $Q_i > Q_j$; $Q_i - Q_j = \Delta Q_{ij}$; $\frac{Q_i}{Q_j} = x_{ij}$.
10. Является ли шкала наименований шкалой физических величин?
11. Объясните, почему на шкале порядка невозможно ввести единицу измерения.
12. Почему нельзя считать измерением определение значений величин с помощью шкал порядка?
13. Поясните, от каких величин зависит выбор начала отсчета на шкале интервалов. Приведите примеры шкал интервалов.
14. Можно ли определить размер физической величины с помощью шкал порядка?
15. Каким образом устанавливаются единицы измерений в шкалах отношений?
16. Поясните, почему абсолютные шкалы не зависят от принятой системы единиц измерения.
17. Дайте определение системы единиц ФВ.
18. Проведите классификацию ФВ по степени условной независимости от других величин данной группы ФВ.
19. Приведите примеры основных и производных ФВ.
20. Дайте определение кратных и дольных единиц. Приведите примеры.

РАЗДЕЛ 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

2.1. Классификация погрешностей

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

Истинным называется значение ФВ, идеальным образом характеризующее свойство данного объекта как в количественном, так и в качественном отношении. 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 ФВ, найденное экспериментально и настолько близкое к истинному, что в поставленной измерительной задаче оно может быть использовано вместо него.

Результат измерения представляет собой значение величины, полученное путем измерения.

Погрешность результата измерения – это отклонение результата измерения X от истинного (или действительного) значения Q измеряемой величины:

$$\Delta X = X - Q. \quad (2.1)$$

Она указывает границы неопределенности значения измеряемой величины. Близость к нулю погрешности результата измерения отражает *точность результата измерений*, которая является одной из характеристик качества измерения. Считают, что чем меньше погрешность измерения, тем больше его точность.

Погрешность средства измерений – разность между показанием СИ и истинным (действительным) значением измеряемой ФВ. Она характеризует *точность средства измерений* (характеристику качества СИ, отражающую близость его погрешности к нулю).

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

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

Случайная погрешность – составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений одного и того же размера ФВ, проведенных с одинаковой тщательностью в одних и тех же условиях. В появлении таких погрешностей, изображенных на рис. 2.1(а), 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.

Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно меняющаяся при повторных измерениях одной и той же ФВ. Постоянная и переменная систематические погрешности показаны на рис. 2.1(б). Их отличительный признак заключается в том, что они могут быть предсказаны, обнаружены и благодаря этому почти полностью устранены введением соответствующей поправки.

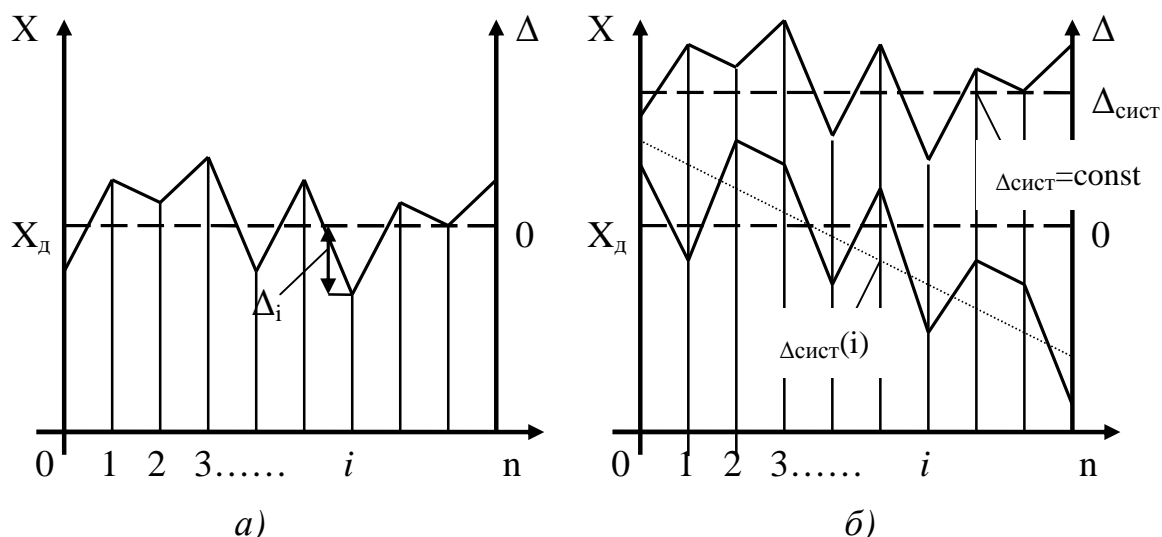


Рис. 2.1. Изменение: а – случайной, б – постоянной и переменной систематических погрешностей от измерения к измерению

Прогрессирующая (дрейфовая) погрешность – это непредсказуемая погрешность, медленно меняющаяся во времени. Прогрессирующие погрешности могут быть скорректированы поправками только в данный момент времени, а далее вновь непредсказуемо изменяются. Их изменение во времени представляет собой нестационарный случайный процесс, поэтому в рамках хорошо разработанной теории стационарных случайных процессов они могут быть описаны лишь с известными оговорками. Прогрессирующая погрешность – это понятие, специфичное для нестационарного случайного процесса изменения погрешности во времени, оно не может быть сведено к понятиям случайной и систематической погрешностей. Последние характерны лишь для стационарных случайных процессов.



Рис 2.2. Классификация погрешностей

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 приведенную погрешности.

Абсолютная погрешность описывается формулой (2.1) и выражается в единицах измеряемой величины. Однако она не может в полной мере служить показателем точности измерений, так как одно и то же ее 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 есть отношение абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x}, \text{ или } \delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 \% . \quad (2.2)$$

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 СИ, так как при изменении значений x , относительная погрешность принимает различные значения вплоть до бесконечности при $x=0$. В связи с этим для указания и нормирования погрешности СИ используется еще одна разновидность погрешности – приведенная.

Приведенная погрешность средства измерений – это относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность СИ отнесена к условно принятому значению x_N , постоянному во всем диапазоне измерений или его части:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_N}, \text{ или } \gamma = \frac{\Delta x}{x_N} \cdot 100 \% . \quad (2.3)$$

Условно принятое значение x_N называют **нормирующим**. Чаще всего за него принимают верхний предел измерений данного СИ, применительно к которым и используется главным образом понятие «приведенная погрешность». Приведенную 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 СИ. Иногда эту погрешность называют **аппаратурной**.

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 свойство, которое определяется путем измерения;

- влиянием способов применения СИ. 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 возникают существенные погрешности, для компенсации действия которых следует вводить поправки. Иногда погрешность метода называют *теоретической погрешностью*;
- влиянием других факторов, не связанных со свойствами используемых СИ.

Отличительной особенностью погрешностей метода является то, что они не могут быть указаны в документации на используемое СИ, поскольку от него не зависят; их должен определять оператор в каждом конкретном случае. В связи с этим оператор должен четко 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, напряженности магнитного поля, вибрации и др.); неправильной установки средств измерений, нарушения правил их взаимного расположения и др.

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

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 величине, и *нелинейные* Δ_n , имеющие нелинейную зависимость от измеряемой величины.

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

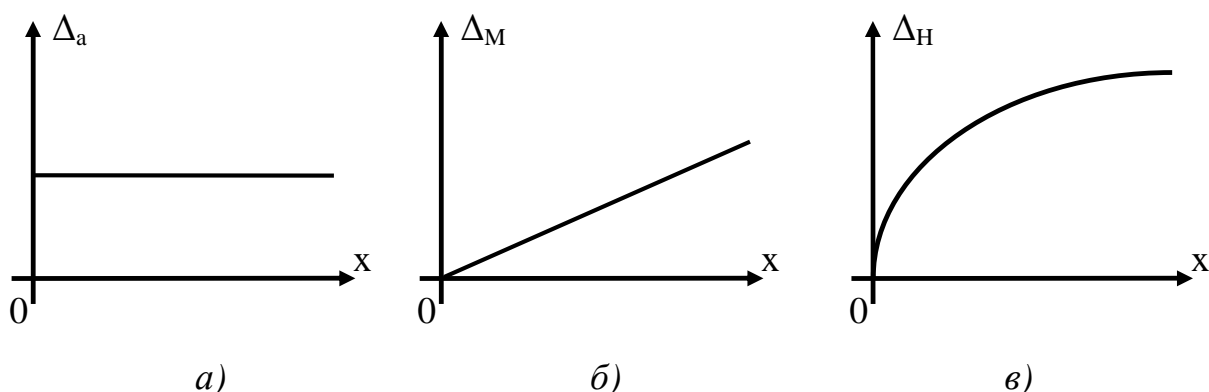


Рис.2.3. Аддитивная (а), мультипликативная (б) и нелинейная (в) погрешности

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

В зависимости от влияния характера изменения измеряемых величин погрешности СИ делят на статические и динамические. *Статической* называется погрешность средства измерений, применяемого для измерения ФВ, принимаемой за неизменную. *Динамической* называется погрешность СИ, возникающая дополнительно при измерении изменяющейся (в процессе измерений) ФВ. Динамическая погрешность СИ обусловлена несоответствием его реакции на скорость (частоту) изменения измеряемого сигнала.

2.2. Погрешность и неопределенность

К началу 80-х годов методы описания погрешности измерения, построенные на разделении погрешности на случайную и систематическую, стали подвергаться определенной критике. Эти методы перестали удовлетворять требованиям, предъявляемым к метрологическим задачам и сложившаяся ситуация затрудняла развитие отдельных теоретических и прикладных вопросов метрологии.

Это привело к возникновению различных инициатив, одной из которых была новая концепция представления результатов измерений, развиваемая по инициативе международных метрологических организаций. Ее суть состоит в следующем. Обработка результатов измерений во всех странах проводится с использованием аппарата теории вероятностей и математической статистики. Практически везде погрешности разделяются на случайные и систематические. Однако модели погрешностей, значения довери-

тельных вероятностей и формирование доверительных интервалов в разных странах мира отличается друг от друга. Это приводит к трудностям при сличении результатов измерений, полученных в лабораториях различных стран.

Поэтому в 1978 г., признавая отсутствие международного единства по вопросу выражения неопределенности измерения, наивысший мировой авторитет в метрологии – Международный комитет мер и весов (МКМВ) обратился к Международному бюро мер и весов (МБМВ) с просьбой рассмотреть эту проблему совместно с национальными метрологическими лабораториями и разработать рекомендацию.

К началу 90-х годов с участием ряда международных организаций (МОЗМ, МКМВ, МБМВ, ИСО, МЭК) был разработан документ, содержащий новую концепцию описания результатов измерений [26]. Документ содержит правила для стандартизации, калибровки, аккредитации лабораторий метрологических служб. Основные положения руководства [27]:

- отказ от использования таких понятий, как истинное и действительное значения измеряемой величины, погрешность, относительная погрешность, точность измерения, случайная и систематическая погрешности;
- введение нового термина «неопределенность» – параметра, связанного с результатом измерения и характеризующего рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине;
- разделение составляющих неопределенности на два типа А и В. Вновь вводимые группы неадекватны случайным и систематическим погрешностям. Разделение основано не на теоретических предположениях, а на практических соображениях.

Неопределенности типа А могут быть оценены статистическими методами на основе многократных измерений и описываются традиционными характеристиками центрированных случайных величин – дисперсией или СКО. Взаимодействие этих неопределенностей описывается взаимным корреляционным моментом, или коэффициентом взаимной корреляции.

Неопределенности типа В могут быть оценены любыми другими методами, кроме статистических. Они должны описываться величинами, аналогичными дисперсии или СКО, так как именно эти характеристики можно использовать для объединения неопределенностей типа В как между собой, так и с неопределенностями типа А.

Сейчас общепризнано, что, когда все известные или предполагаемые компоненты погрешности оценены и внесены соответствующие поправки, все еще остается неопределенность относительно истинности указанного результата, т.е. сомнение в том, насколько точно результат измерения представляет значение измеряемой величины [26].

Также, как Международная система единиц (СИ), будучи системой практически универсального использования, привнесла согласованность во

все научные и технологические измерения, всемирное единство в оценке и выражении неопределенности измерения обеспечило бы должное понимание и правильное использование широкого спектра результатов измерений в науке, технике, промышленности и регулирующих актах. Необходимо, чтобы метод для оценки и выражения неопределенности был единым во всем мире так, чтобы измерения, проводимые в разных странах, можно было легко сличать.

2.3. Правила округления результатов измерений

Поскольку погрешности измерений определяют лишь зону неопределенности результатов, их не требуется знать очень точно. В окончательной записи погрешность измерения принято выражать числом с одним или двумя значащими цифрами. Эмпирически были установлены следующие правила округления рассчитанного значения погрешности и полученного результата измерения.

1. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной – если первая есть 3 или более.
2. Результат измерения округляется до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то нули отбрасываются до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.
Пример: Число 999,99872142 при погрешности $\pm 0,000005$ следует округлять до 999,998721.
3. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остальные цифры числа не изменяются. Лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются. Пример: При сохранении четырех значащих цифр число 283435 должно быть округлено до 283400; число 384,435 – до 384,4.
4. Если цифра старшего отбрасываемого разряда больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу.
Пример: При сохранении трех значащих цифр число 17,58 округляют до 17,6; число 18598 – до 18600; число 352,521 – 353.
5. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны или являются нулями, то последнюю сохраняемую цифру числа не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная.
Пример: При сохранении трех значащих цифр число 264,50 округляют до 264; число 645,5 – до 646.
6. Округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

Если руководствоваться этими правилами округления, то количество значащих цифр в числовом значении результата измерений позволяет ориентировочно судить о точности измерения. Это связано с тем, что предельная погрешность, обусловленная округлением, равна половине единицы последнего разряда числового значения результата измерения.

2.4. Контрольные вопросы

1. Можно ли определить истинное значение измеряемой величины?
2. Запишите формулу для определения погрешности результата измерения.
3. Проведите классификацию погрешностей измерений в зависимости от характера проявления.
4. Отличаются ли признаки классификации погрешностей результатов измерений и погрешностей средств измерений?
5. Наблюдается ли какая-нибудь закономерность в появлении случайных погрешностей измерений?
6. Каким образом можно существенно уменьшить случайные погрешности измерений? Можно ли совсем устранить случайные погрешности?
7. Можно ли устранить систематические погрешности?
8. Может ли систематическая погрешность измерения изменяться при повторных измерениях одной и той же физической величины?
9. Может ли абсолютная погрешность измерений в полной мере служить показателем точности измерений?
10. Как изменяется относительная погрешность измерений с уменьшением действительного или измеренного значения измеряемой величины?
11. Укажите причины возникновения погрешности метода измерений.
12. Можно ли устранить прогрессирующие погрешности?
13. Погрешность метода измерений по характеру проявления относится к систематической или случайной погрешности?
14. Укажите причины возникновения дополнительной погрешности средства измерений.
15. Чем обусловлено наличие динамической погрешности средства измерения?
16. Приведите классификацию погрешностей измерения по зависимости абсолютной погрешности от значений измеряемой величины.
17. Что характеризует термин «неопределенность измерения»?
18. Укажите два типа неопределенности измерений в соответствии со способом оценки их численного значения.
19. Назовите причины разработки новой концепции представления результатов измерений и введения нового термина «неопределенность измерения».
20. Определите, чему равна предельная погрешность, обусловленная округлением.

РАЗДЕЛ 3. СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

3.1. Систематические погрешности и их классификация

Систематическая погрешность представляет собой определенную функцию влияющих факторов, состав которых зависит от физических, конструктивных и технологических особенностей СИ, условий их применения, а также от индивидуальных качеств наблюдателя. 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 путем подбора операторов высокой квалификации и соблюдения требований эргономики при разработке СИ.
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. Основной 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.

Систематические погрешности принято классифицировать по двум признакам: по характеру измерения и по причинам возникновения погрешности.

В зависимости от *характера измерения* систематические погрешности измерения подразделяются на постоянные, прогрессивные, периодические и погрешности, изменяющиеся по сложному закону.

Постоянные погрешности – погрешности, которые длительное время сохраняют свое значение, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений. Они встречаются наиболее часто. К постоянным относятся погрешности большинства мер (гирь, концевых мер длины), погрешности градуировки шкал измерительных приборов, погрешность от постоянного дополнительного веса на чашке весов и др.

Прогрессивные погрешности – непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа измерительных наконечников, контактирующих с

деталью при контроле ее прибором активного контроля, постепенный разряд батареи, питающей СИ и др.

Периодические погрешности – погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора. Обычно эти погрешности встречаются в угломерных приборах с круговой шкалой. Также примером может служить погрешность, обусловленная суточными колебаниями напряжения силовой питающей сети, температуры окружающей среды и др.

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

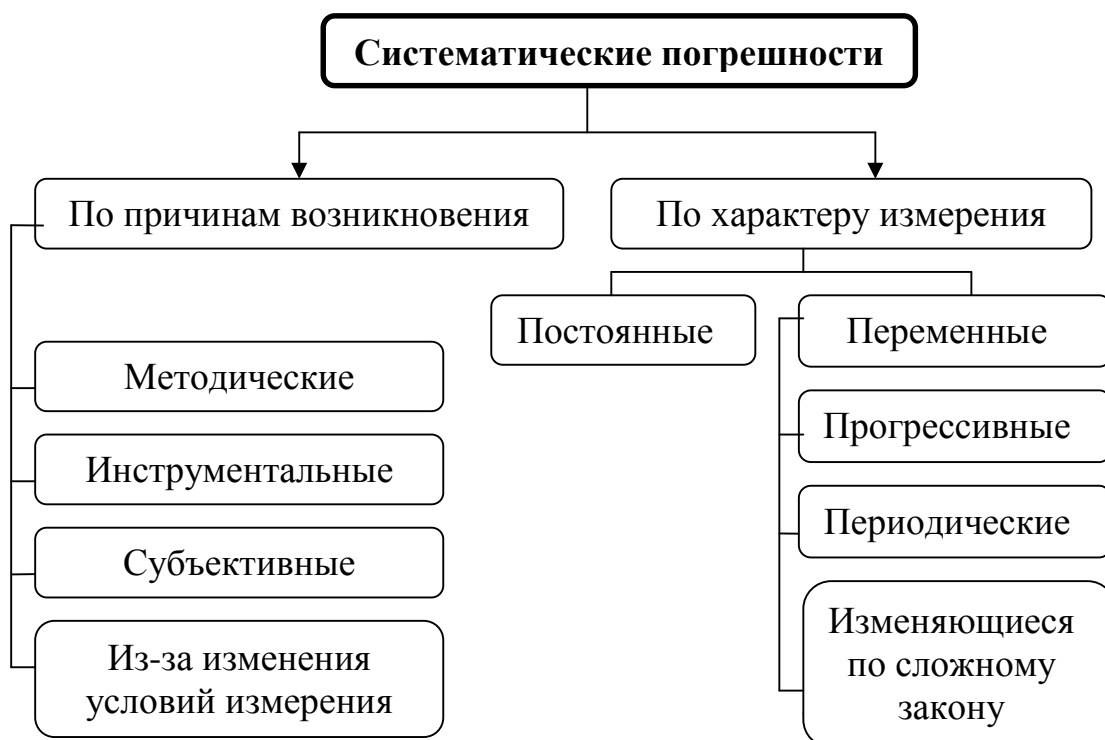


Рис. 3.1. Классификация систематических погрешностей

В зависимости от **причин возникновения** систематические погрешности измерения делятся на инструментальные погрешности измерения, погрешности метода измерений, погрешности из-за изменения условий измерения и субъективные погрешности измерения.

Инструментальная погрешность измерения обусловлена погрешностью применяемого СИ. Иногда эту погрешность называют *аппаратурной*. Постоянные инструментальные систематические погрешности обычно выявляют посредством поверки СИ. **Поверка средства измерений** – установление органом государственной метрологической службы пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям [24]. Поверка СИ производится путем сравнения показаний поверяемого прибора с

показаниями образцового СИ. Обнаруженные постоянные инструментальные систематические погрешности исключаются из результата измерения с помощью введения поправки.

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 путем измерения;
- влиянием способов применения СИ. 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 возникают существенные погрешности, для компенсации действия которых следует вводить поправки. Иногда погрешность метода называют *теоретической погрешностью*;
- влиянием других факторов, не связанных со свойствами используемых СИ.

Отличительной особенностью погрешностей метода является то, что они не могут быть указаны в документации на используемое СИ, поскольку от него не зависят; их должен определять оператор в каждом конкретном случае. В связи с этим оператор должен четко 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, напряженности магнитного поля, вибрации и др.); неправильной установки средств измерений, нарушения правил их взаимного расположения и др.

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

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

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 ее малости [24].

Иногда этот вид погрешности называют *неисключенным остатком систематической погрешности*.

Неисключенная систематическая погрешность характеризуется ее границами.

Границы неисключенной систематической погрешности Θ при числе слагаемых $N \leq 3$ вычисляют по формуле

$$\Theta = \pm \sum_{i=1}^N |\Theta_i|,$$

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

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

$$\Theta = \pm K \sqrt{\sum_{i=1}^N \Theta_i^2},$$

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 СИ и снижения качества продукции в производстве.

3.2. Способы обнаружения и устранения систематических погрешностей

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, исключаящие их возникновение или устраняющие их влияние на результат измерения. В связи с этим в практике измерений стараются устранить систематические погрешности не путем обработки экспериментальных данных, а применением СИ, 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

$$x_i = Q + \Delta_i + \Theta_i,$$

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:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = Q + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Theta_i.$$

Если систематическая погрешность постоянна во всех измерениях, т.е. $\Theta_i = \Theta$, то

$$\bar{X} = Q + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i + \Theta.$$

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

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

Для устранения **постоянных систематических погрешностей** применяют следующие методы:

– **Метод измерений замещением**, являющийся разновидностью метода сравнения с мерой. Сравнение осуществляется замещением измеряемой величины мерой с известным значением величины, причем так, что при этом в состоянии и действии всех используемых СИ не происходит никаких изменений.

Пример: при измерении электрических параметров, таких как: сопротивление, емкость, индуктивность, объект подключается в измерительную цепь. В большинстве случаев при этом пользуются нулевыми методами (мостовым, компенсационным и др.), при которых производится электрическое уравнивание цепи. После этого, не меняя схемы, вместо измеряемого объекта включают меру переменного значения (магазин сопротивлений, емкости, индуктивности и т.д.) и, изменяя их значение, добиваются восстановления равновесия цепи. В этом случае способом замещения исключается остаточная неуравновешенность мостовых цепей, влияния на цепь магнитных и электрических полей и др.

Пример: взвешивание на пружинных весах, у которых имеется постоянная систематическая погрешность (из-за смещения шкалы, например). Взвешивание производится в два приема (рис. 3.1).

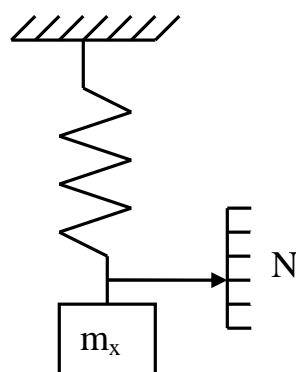


Рис. 3.2. Иллюстрация метода измерений замещением (метод Борда)

Вначале 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 поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов называется методом Борда.

– **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.

Пример: рассмотрим взвешивание на равноплечных весах (рис. 3.2). 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 уравнивающих

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 $m_x = m_0$.

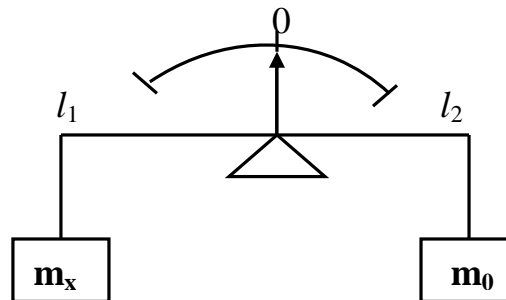


Рис. 3.3. Иллюстрация метода противопоставления

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 $\Theta = m_0 \left(\frac{l_2}{l_1} - 1 \right)$. Для исключения этой

погрешности взвешивание производится в два этапа. Сначала взвешивают груз m_x , уравнивая весы гирями 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 уравнивают весы гирями массой m_{02} . Теперь получим $m_{02} l_1 = m_x l_2$. Исключив из равенств отношение l_2/l_1 , найдем $m_x = \sqrt{m_{01} \cdot m_{02}}$. Как видно из формулы, длины плеч не входят в окончательный результат взвешивания.

– **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:

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

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

Пример: 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 СИ поворачивают в горизонтальной плоскости на 180° . Если в первом случае магнитное поле Земли, складываясь с полем СИ, вызывало

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

– **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 приемы 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.

Пример: частым случаем погрешности, изменяющейся по определенному закону, является погрешность, прогрессирующая по линейному закону, например, пропорционально времени. В этом случае погрешность можно оценить и исключить следующим образом. Если известно, что при измерении постоянной величины x_0 систематическая погрешность изменяется линейно во времени, т.е. $x_{изм} = x_0 + C t$ (где $C = const$), то для ее исключения достаточно сделать два наблюдения x_1 и x_2 с фиксацией времени t_1 и t_2 (рис. 3.4).

Тогда искомое значение величины будет

$$x_0 = \frac{x_1 t_2 - x_2 t_1}{t_2 - t_1}.$$

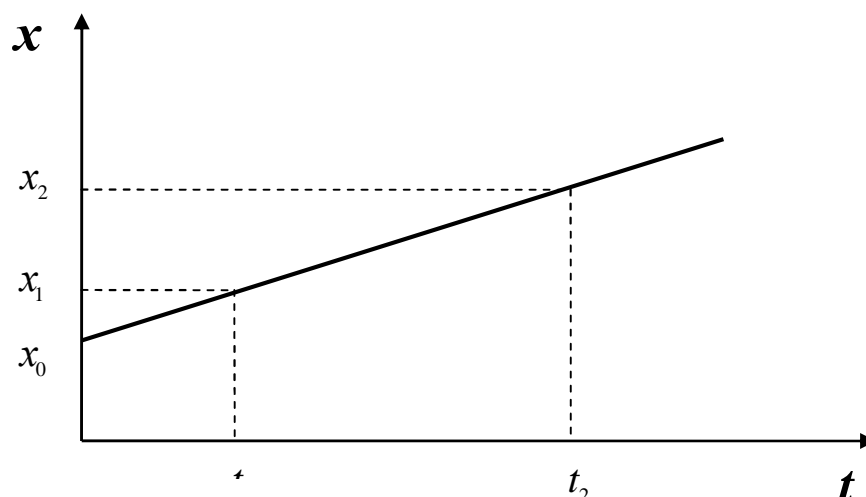


Рис. 3.4. Линейное изменение систематической погрешности

Если предположение о линейном законе изменения систематической погрешности не очевидно, то для контроля систематической погрешности применяют метод симметричных наблюдений.

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

Пример: несколько наблюдений выполняют через равные промежутки времени и затем вычисляют средние арифметические симметрично расположенных отсчетов (рис. 3.5), например $\frac{x_1 + x_5}{2}$ и $\frac{x_2 + x_4}{2}$.

Теоретически, при линейной зависимости погрешности от времени, эти средние арифметические должны быть равны – это и дает возможность контролировать ход изменения погрешности. Убедившись, что погрешность изменяется по линейному закону, по формуле

$$x_0 = \frac{x_1 t_2 - x_2 t_1}{t_2 - t_1}$$

находят результат измерения.

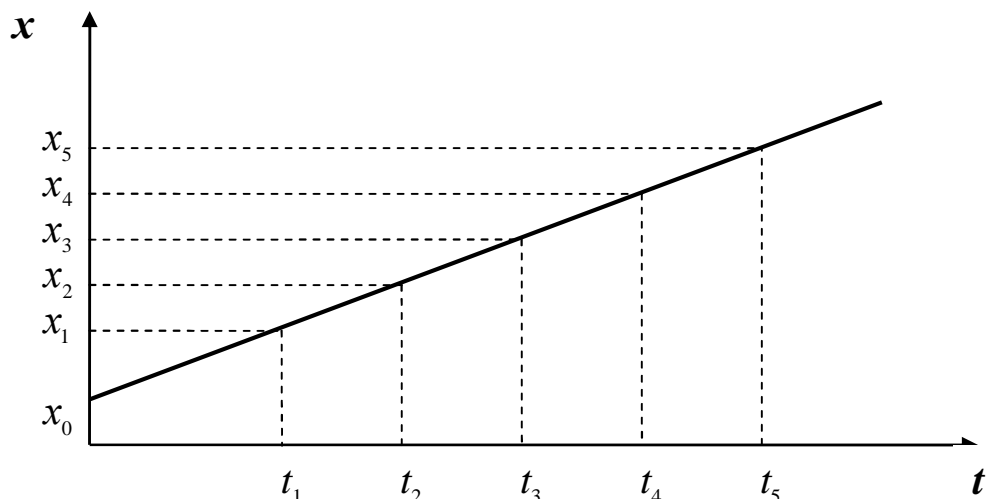


Рис. 3.5. Метод симметричных наблюдений

Кроме того, существуют еще **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 ее возникновения); критерий Вилкоксона (применяется, если закон распределения результатов измерений неизвестен).

Исключение систематических погрешностей путем введения поправок. 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 составляющих в результат измерения приходится вводить множество поправок. При этом вследствие ограниченной точности определения поправок случайные погрешности результата измерения накапливаются и его дисперсия увеличивается.

3.3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «систематическая погрешность измерения».

2. Поясните особенности влияния систематических погрешностей на результат измерения.
3. Определите основные составляющие процесса измерения, влияющие на оценку систематических погрешностей.
4. По каким двум признакам принято классифицировать систематические погрешности?
5. Проведите классификацию систематических погрешностей измерения в зависимости от характера измерения.
6. Укажите отличия и приведите примеры следующих разновидностей систематических погрешностей: постоянных, прогрессивных, периодических и погрешностей, изменяющихся по сложному закону.
7. Проведите классификацию систематических погрешностей измерения в зависимости от причин возникновения.
8. Укажите отличия и приведите примеры следующих разновидностей систематических погрешностей: инструментальная, погрешность метода измерений, погрешность (измерения) из-за изменения условий измерения, субъективная (личная).
9. Назовите способ выявления постоянных инструментальных погрешностей СИ.
10. Чем обусловлена погрешность метода измерений.
11. Поясните, что такое неисключенная систематическая погрешность и определите правила определения её границ.
12. Определите пути исключения и учета влияния систематических погрешностей.
13. Определите методы устранения постоянных систематических погрешностей.
14. Приведите примеры применения метода измерений замещением для устранения постоянных систематических погрешностей.
15. Приведите примеры применения метода измерений противопоставлением для устранения постоянных систематических погрешностей.
16. Приведите примеры измерения с помощью метода компенсации погрешности по знаку для устранения постоянных систематических погрешностей.
17. Объясните область применения, достоинства методов противопоставления и симметричных наблюдений при исключении систематических погрешностей.
18. Определите методы устранения переменных и монотонно изменяющихся систематических погрешностей.
19. Определите специальные статистические методы устранения систематических погрешностей.
20. Определите исключение систематических погрешностей путем введения поправок. Приведите примеры.

РАЗДЕЛ 4. СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

4.1. Вероятностное описание результатов и погрешностей

Если при повторных измерениях одной и той же физической величины, проведенных с одинаковой тщательностью и в одинаковых условиях получаемые результаты, отличаются друг от друга, то это свидетельствует о наличии случайных погрешностей. Случайные погрешности являются результатом одновременного воздействия на измеряемую величину многих случайных возмущений. Предсказать результат наблюдения или исправить его введением поправки невозможно. Можно лишь с определенной долей уверенности утверждать, что истинное значение измеряемой величины находится в пределах разброса результатов наблюдений от x_{\min} до x_{\max} , где x_{\min} , x_{\max} – соответственно, нижняя и верхняя границы разброса. Однако остается неясным, какова вероятность появления того или иного значения погрешности, какое из множества лежащих в этой области значений величины принять за результат измерения и какими показателями охарактеризовать случайную погрешность результата. Для ответа на эти вопросы требуется принципиально иной, чем при анализе систематических погрешностей, подход. Подход этот основывается на рассмотрении результатов наблюдений, результатов измерений и случайных погрешностей как случайных величин. Методы теории вероятностей и математической статистики позволяют установить вероятностные (статистические) закономерности появления случайных погрешностей и на основании этих закономерностей дать количественные оценки результата измерения и его случайной погрешности [2].

Для характеристики свойств случайной величины в теории вероятностей используют понятие закона распределения вероятностей случайной величины. Различают две формы описания закона распределения: интегральную и дифференциальную. В метрологии преимущественно используется дифференциальная форма – закон распределения плотности вероятностей случайной величины.

Рассмотрим формирование дифференциального закона на примере измерений с многократными наблюдениями. Пусть произведено n последовательных наблюдений одной и той же величины x и получена группа наблюдений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Каждое из значений x_i содержит ту или иную случайную погрешность. Расположим результаты наблюдений в порядке их возрастания, от x_{\min} до x_{\max} и найдем размах ряда $L = x_{\max} - x_{\min}$. Разделив размах ряда на k равных интервалов $\Delta l = L/k$, подсчитаем количество наблюдений n_k , попадающих в каждый интервал. Оптимальное число интервалов определяют по формуле Стерджесса $k = 1 + 3,3 \lg n$. Изобразим полученные результаты графически, нанеся на ось абсцисс значения физической величины и обозначив границы интервалов,

а на ось ординат – относительную частоту попаданий n_k/n . Построив на диаграмме прямоугольники, основанием которых является ширина интервалов, а высотой n_k/n , получим гистограмму, дающую представление о плотности распределения результатов наблюдений в данном опыте.

На рис. 4.1 показана полученная в одном из опытов гистограмма, построенная на основании результатов 100 наблюдений, сгруппированных в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Результаты наблюдений

Номер интервала	1	2	3	4	5	6	7
n_k	6	12	18	25	17	14	8
n_k/n	0,06	0,12	0,18	0,25	0,17	0,14	0,08

В данном опыте в первый и последующие интервалы попадает соответственно 0,06; 0,12; 0,18; 0,25; 0,17; 0,14 и 0,08 от общего количества наблюдений; при этом, очевидно, что сумма этих чисел равна единице.

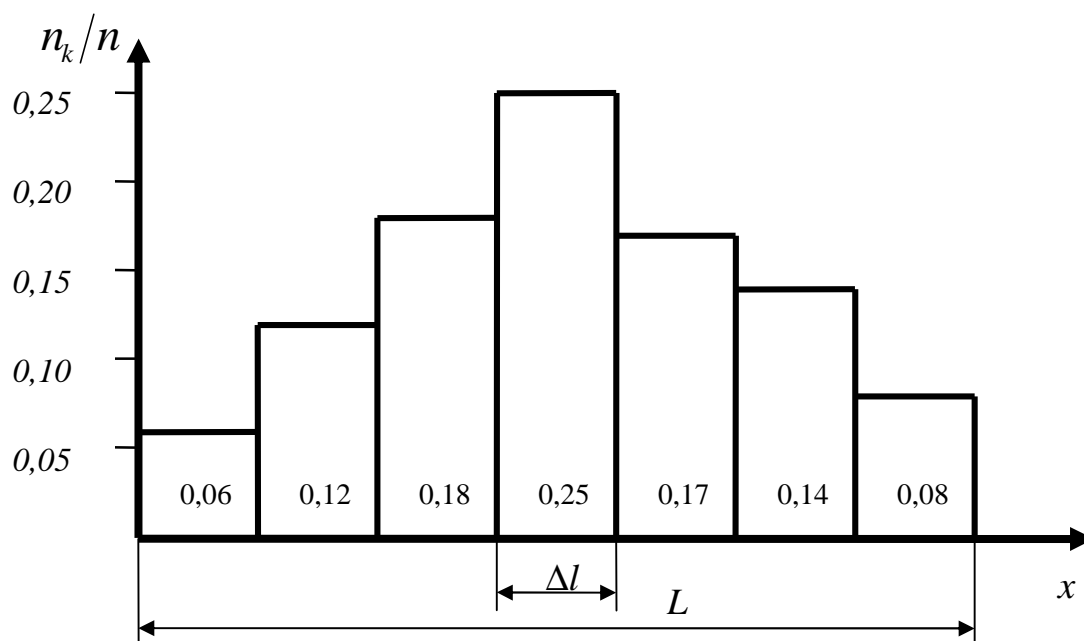


Рис. 4.1. Гистограмма

Если распределение случайной величины x статистически устойчиво, то можно ожидать, что при повторных сериях наблюдений той же величины, в тех же условиях, относительные частоты попаданий в каждый интервал будут близки к первоначальным. Это означает, что построив гистограмму один раз, при последующих сериях наблюдений можно с определенной долей уверенности заранее предсказать распределение результатов наблюдений по интервалам. Приняв общую площадь, ограниченную

контурам гистограммы и осью абсцисс, за единицу, $S_0 = 1$, относительную частоту попаданий результатов наблюдений в тот или иной интервал можно определить как отношение площади соответствующего прямоугольника шириной Δl к общей площади.

При бесконечном увеличении числа наблюдений $n \rightarrow \infty$ и бесконечном уменьшении ширины интервалов $\Delta l \rightarrow 0$, ступенчатая кривая, огибающая гистограмму, перейдет в плавную кривую $f(x)$ (рис. 4.2), называемую *кривой плотности распределения вероятностей случайной величины*, а уравнение, описывающее ее, – дифференциальным законом распределения. Кривая плотности распределения вероятностей всегда неотрицательна и подчинена условию нормирования в виде

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

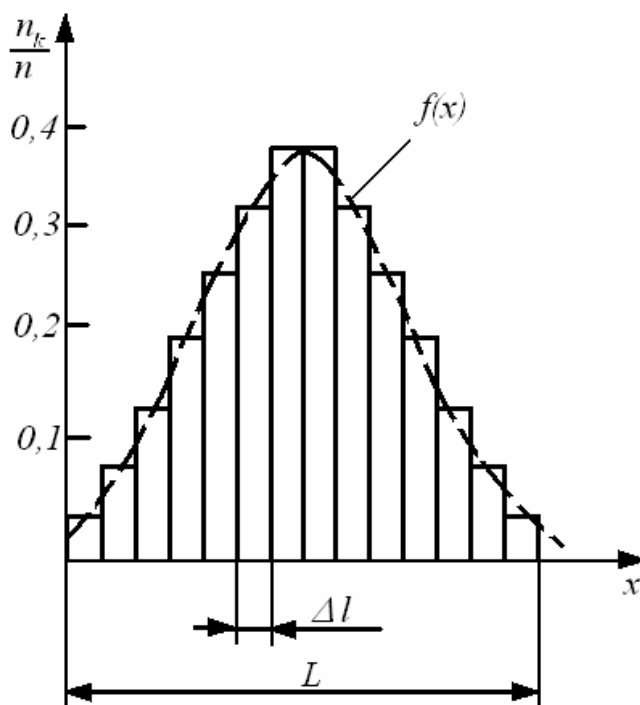


Рис. 4.2. Кривая плотности распределения вероятностей

Закон распределения дает полную информацию о свойствах случайной величины и позволяет ответить на поставленные вопросы о результате измерения и его случайной погрешности. Если известен дифференциальный закон распределения $f(x)$, то вероятность P попадания случайной величины x в интервал от x_1 до x_2 можно записать в следующем виде

$$P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = \int_{x_2}^{x_1} f(x) dx.$$

Графически эта вероятность выражается отношением площади, лежащей под кривой $f(x)$ в интервале от x_1 до x_2 к общей площади, ограниченной

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

Вероятность этого события называется функцией распределения случайной величины и обозначается $F(x)$. Функцию распределения $F(x)$ иногда называют также *интегральной функцией распределения*. В терминах интегральной функции распределения имеем

$$P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = F(x_2) - F(x_1),$$

т.е. вероятность попадания результата наблюдений или случайной погрешности в заданный интервал равна разности значений функции распределения на границах этого интервала.

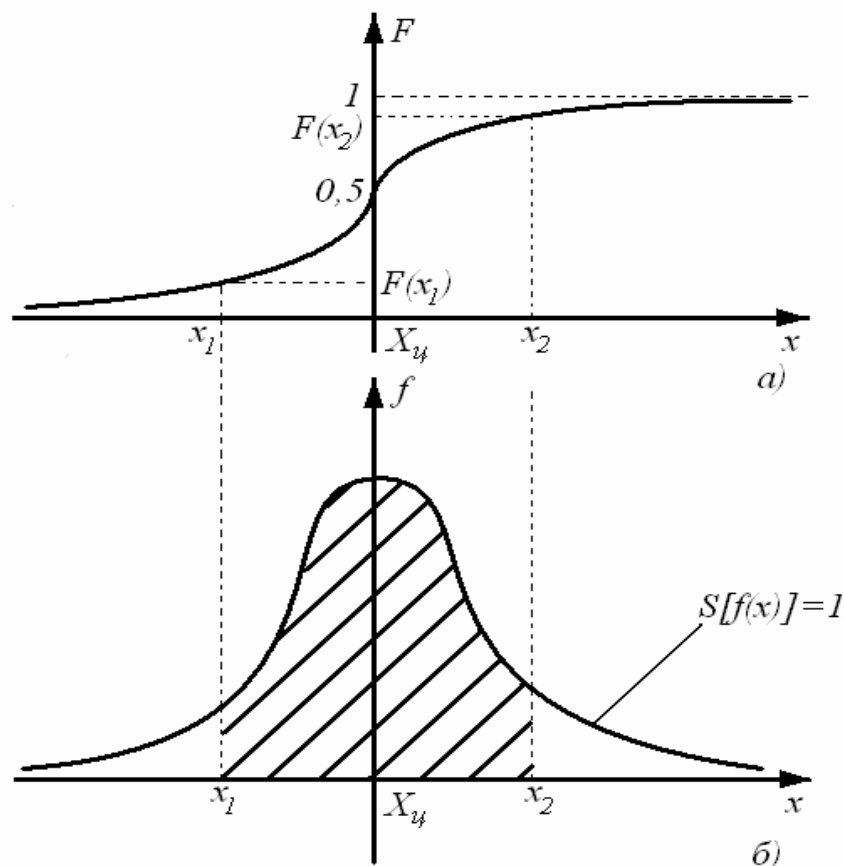


Рис.4.3. Интегральная (а) и дифференциальная (б) функции распределения случайной величины

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 . График интегральной функции распределения показан на рис. 4.3, а. 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 ее изменения: от 0 до 1, т.е. $F(-\infty) = 0; F(+\infty) = 1$;
- вероятность нахождения случайной величины x в диапазоне от x_1 до x_2 : $P\{x_1 < x < x_2\} = F(x_2) - F(x_1)$.

Запишем функцию распределения через плотность:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx.$$

Площадь, ограниченная кривой распределения, лежащая левее точки x (x – текущая переменная) (рис. 4.4), отнесенная к общей площади, есть не что иное, как интегральная функция распределения $F(x) = P\{x_i < x\}$.

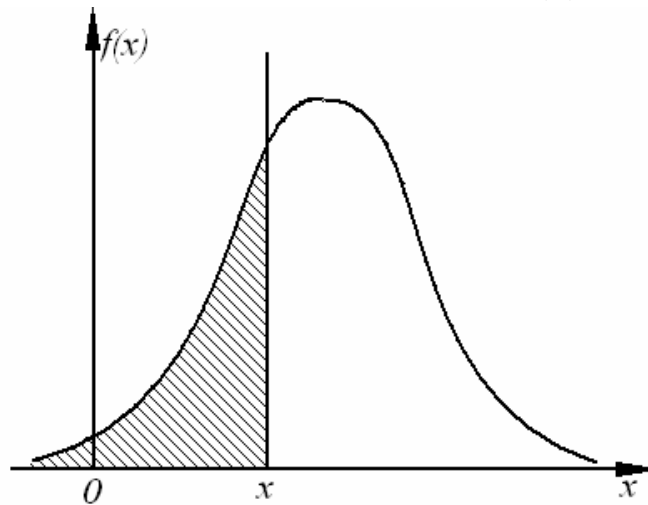


Рис. 4.4. Кривая плотности распределения вероятностей (дифференциальная функция распределения случайной величины)

Плотность распределения вероятностей $f(x)$ называют дифференциальной функцией распределения:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}.$$

Пример распределения дискретной случайной величины приведен на рис. 4.5.

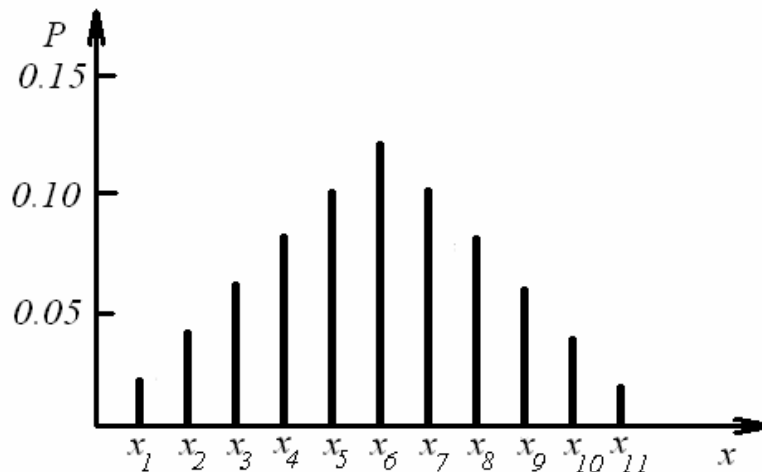


Рис. 4.5. Распределение дискретной случайной величины

4.2. Числовые параметры законов распределения. Центр распределения. Моменты распределений

Функция распределения является самым универсальным способом описания поведения результатов измерений и случайных погрешностей. Однако для их определения необходимо проведение весьма длительных и кропотливых исследований и вычислений. В большинстве случаев бывает достаточно охарактеризовать случайные величины специальными параметрами, основными из которых являются:

- центр распределения;
- начальные и центральные моменты и производные от них коэффициенты – математическое ожидание (МО), среднее квадратическое отклонение (СКО), эксцесс, контрэксцесс и коэффициент асимметрии.

Координата центра распределения X_u определяет положение случайной величины на числовой оси и может быть найдена несколькими способами.

Наиболее фундаментальным является определение центра по принципу симметрии вероятностей, т.е. нахождение такой точки X_M на оси x , слева и справа от которой вероятности появления различных значений случайных погрешностей равны между собой и составляют $P_1 = P_2 = 0,5$:

$$F(X_M) = \int_{-\infty}^{X_M} f(x)dx = \int_{X_M}^{+\infty} f(x)dx = 0,5.$$

Точка X_M называется *медианой*, или 50%-ным квантилем. Для его нахождения у распределения случайной величины должен существовать только нулевой начальный момент.

Координата X_u может быть определена и как центр тяжести распределения, т.е. как *математическое ожидание* случайной величины. Это такая точка \bar{X} , относительно которой опрокидывающий момент геометрической фигуры, огибающей которой является кривая $f(x)$, равен нулю:

$$\bar{X} = m_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x)dx.$$

У некоторых распределений, например, у распределения Коши, не существует МО, так как определяющий его интеграл расходится.

При симметричной кривой плотности распределения вероятностей $f(x)$ оценкой центра распределения может служить абсцисса *моды* распределения, т.е. координата максимума плотности распределения X_m . Однако есть распределения, у которых не существует моды, например, равномерное. Распределения с одним максимумом называются *одномодальными*, с двумя – *двухмодальными*. Те распределения, у которых в

средней части расположен не максимум, а минимум, называются *антимодальными*.

Для двухмодальных распределений применяется оценка центра в виде *центра сгибов*:

$$X_c = \frac{x_{c1} + x_{c2}}{2},$$

где x_{c1}, x_{c2} – сгибы, т.е. абсциссы точек, в которых распределение достигает максимумов.

Для ограниченных распределений применяется оценка в виде *центра размаха*:

$$X_p = \frac{x_1 + x_2}{2},$$

где x_1, x_2 – первый и последний члены вариационного ряда, соответствующего распределению.

При выборе оценки центра распределения необходимо учитывать ее чувствительность к наличию промахов в обрабатываемой совокупности данных. Исключительно чувствительны к наличию промахов: оценка в виде центра размаха X_p (определяется по наблюдениям, наиболее удаленным от центра, каковыми и являются промахи); оценка в виде среднего арифметического (ослабляется лишь в \sqrt{n} раз). Защищенными от влияния промахов являются квантильные оценки: медиана X_M и центр сгибов X_c , поскольку они не зависят от координат промахов.

При статистической обработке данных важно использовать наиболее эффективные, т.е. имеющие минимальную дисперсию, оценки центра распределения, так как погрешность в определении X_u влечет за собой неправильную оценку СКО, границ доверительного интервала, эксцесса и т.д.

Все моменты представляют собой некоторые средние значения, причем, если усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, моменты называются *начальными*, а если от центра распределения – то *центральными*.

Начальные моменты k -го порядка определяются формулами

$$m_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k f(x) dx;$$

$$m_k = \sum_{i=1}^n x_i^k p_i,$$

где p_i – вероятность появления дискретной величины.

Здесь и ниже первая формула относится к непрерывным, а вторая к дискретным случайным величинам.

Из начальных моментов наибольший интерес представляет математическое ожидание МО случайной величины ($k = 1$):

$$m_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx ;$$

$$m_1 = \sum_{i=1}^n x_i p_i .$$
(4.1)

Центральные моменты k -го порядка рассчитываются по формулам

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^k f(x) dx ;$$

$$\mu_k = \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^k p_i .$$

Из центральных моментов особенно важную роль играет второй момент ($k=2$), дисперсия случайной величины D

$$D = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^2 f(x) dx ;$$

$$D = \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^2 p_i .$$
(4.2)

Дисперсия случайной величины характеризует рассеяние отдельных ее значений. Дисперсия имеет размерность квадрата случайной величины и выражает как бы мощность рассеяния относительно постоянной составляющей. Однако чаще пользуются положительным корнем квадратным из дисперсии – средним квадратическим отклонением (СКО) $\sigma = \sqrt{D}$, которое имеет размерность самой случайной величины.

Третий центральный момент

$$\mu_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^3 f(x) dx ;$$

$$\mu_3 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^3 p_i$$

служит характеристикой асимметрии, или скошенности распределения. С его использованием вводится *коэффициент асимметрии* $\nu = \mu_3 / \sigma^3$. Для нормального распределения коэффициент асимметрии равен нулю. Вид законов распределения при различных значениях коэффициента асимметрии приведен на рис. 4.6, а.

Четвертый центральный момент

$$\mu_4 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_1)^4 f(x) dx ;$$

$$\mu_4 = \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^4 p_i$$

служит для характеристики плосковершинности или островершинности распределения. Эти свойства описываются с помощью *эксцесса* $\varepsilon = \mu_4 / \sigma^4$.

Его значения лежат в диапазоне от 1 до ∞ . Для нормального распределения $\varepsilon = 3$. Вид дифференциальной функции распределения при различных значениях эксцесса показан на рис. 4.6, б.

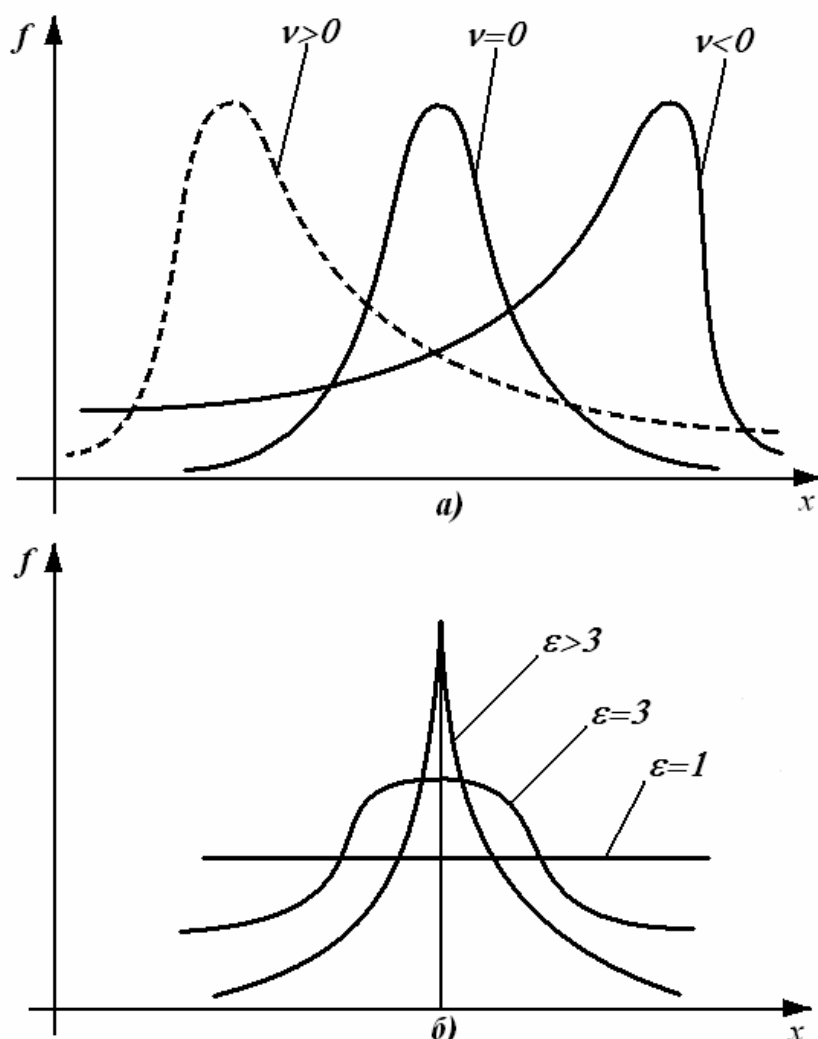


Рис. 4.6. Вид дифференциальной функции распределения при различных значениях коэффициента асимметрии (а) и эксцесса (б)

Дадим более строгое определение постоянной систематической и случайной погрешностей.

Систематической постоянной погрешностью называется отклонение математического ожидания результатов наблюдений от истинного значения измеряемой величины:

$$\Theta = m_1 - Q,$$

а случайной погрешностью – разность между результатом единичного наблюдения и математическим ожиданием результатов:

$$\Delta x = x_i - m_1.$$

В этих обозначениях истинное значение измеряемой величины составляет

$$Q = x_i - \Theta - \Delta x.$$

4.3. Оценка результата измерения

Задача состоит в том, чтобы по полученным экспериментальным путем результатам наблюдений, содержащим случайные погрешности, найти оценку истинного значения измеряемой величины – результат измерения. Будем полагать, что систематические погрешности в результатах наблюдений отсутствуют или исключены.

На практике все результаты измерений и случайные погрешности являются величинами дискретными, т.е. величинами x_i , возможные значения которых отделимы друг от друга и поддаются счету. При использовании дискретных случайных величин возникает задача нахождения точечных оценок параметров, их функций распределения на основании *выборок* – ряда значений x_i , 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.

К оценкам, получаемым по статистическим данным, предъявляются требования состоятельности, несмещенности и эффективности. Оценка называется *состоятельной*, если при увеличении числа наблюдений она стремится к истинному значению оцениваемой величины.

Оценка называется *несмещенной*, если ее математическое ожидание равно истинному значению оцениваемой величины. В том случае, когда можно найти несколько несмещенных оценок, лучшей из них считается та, которая имеет наименьшую дисперсию. Чем меньше дисперсия оценки, тем более *эффективной* считают эту оценку.

Точечной оценкой математического ожидания МО результата измерений является среднее арифметическое значение измеряемой величины

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (4.3)$$

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

Точечная оценка дисперсии, определяемая по формуле

$$\tilde{D}[x] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 , \quad (4.4)$$

является несмещенной и состоятельной.

Оценка среднего квадратического отклонения СКО

$$\tilde{\sigma} = S_x = \sqrt{\tilde{D}[x]} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} . \quad (4.5)$$

Полученные оценки МО и СКО являются случайными величинами. Это проявляется в том, что при повторении несколько раз серий из n наблюдений каждый раз будут получаться различные оценки \bar{X} и $\tilde{\sigma}$. Рассеяние этих оценок целесообразно оценивать СКО $S_{\bar{x}}$. Оценка СКО среднего арифметического значения

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} . \quad (4.6)$$

Полученные оценки позволяют записать итог измерений в виде

$$Q = \bar{X} \pm S_{\bar{x}} .$$

Интервал, определяемый правой частью этого равенства, с некоторой вероятностью «накрывает» истинное значение Q измеряемой величины. Однако точечные оценки ничего не говорят о значении этой вероятности.

Рассмотренные 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 объем выборки, тем легче допустить ошибку при выборе параметра.

Способы нахождения оценок результата зависят от вида функции распределения и от имеющихся соглашений по этому вопросу, регламентируемых в рамках законодательной метрологии.

Распределения погрешностей результатов наблюдений, как правило, являются симметричными относительно центра распределения, поэтому истинное значение измеряемой величины может быть определено как координата центра рассеивания X_u , т.е. центра симметрии распределения случайной погрешности (при условии, что систематическая погрешность исключена). Отсюда следует принятое в метрологии правило оценивания случайной погрешности в виде интервала, симметричного относительно результата измерения ($X_u \pm \Delta x$).

В практике измерений встречаются различные формы кривых распределения случайных величин, целесообразно классифицировать их следующим образом [27]:

- трапецеидальные, например, равномерное, треугольное (Симпсона);
- экспоненциальные, например, распределение Лапласа, распределение Гаусса (нормальное);
- семейство распределений Стьюдента (предельное распределение семейства законов Стьюдента – распределение Коши);

- двухмодальные, например, дискретное двузначное распределение, арксинусоидальное распределение, остро- и кругло-вершинные двухмодальные распределения.

Однако чаще всего имеют дело с нормальным и равномерным распределением плотности вероятностей.

Учитывая многовариантность подходов к выбору оценок и в целях обеспечения единства измерений, правила обработки результатов наблюдений обычно регламентируются нормативно-техническими документами (стандартами, методическими указаниями, инструкциями). Так, в стандарте на методы обработки результатов прямых измерений с многократными наблюдениями указывается, что приведенные в нем методы обработки установлены для результатов наблюдений, принадлежащих нормальному распределению [31].

4.4. Характеристики нормального распределения

Нормальное распределение плотности вероятности или распределение Гаусса (рис. 4.7) характеризуется тем, что, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, такое распределение имеет сумма бесконечно большого числа бесконечно малых случайных возмущений с любыми распределениями.

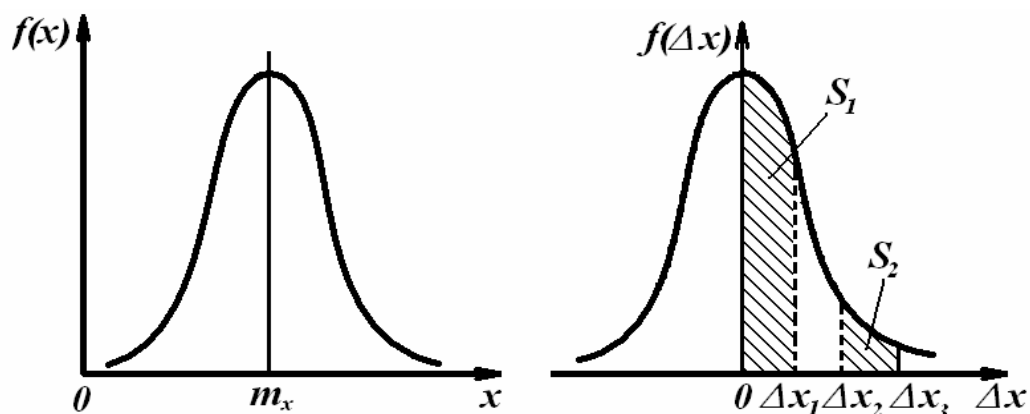


Рис. 4.7. Кривые нормального распределения

Применительно к измерениям это означает, что нормальное распределение случайных погрешностей возникает тогда, когда на результат измерения действует множество случайных возмущений, ни одно из которых не является преобладающим. Практически, суммарное воздействие даже сравнительно небольшого числа возмущений приводит к закону распределения результатов и погрешностей измерений, близкому к нормальному.

В аналитической форме нормальный закон распределения выражается формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4.7)$$

где x – случайная величина; m_x – математическое ожидание случайной величины; σ – среднее квадратическое отклонение (СКО); $e=2,71828$ – основание натурального логарифма; $\pi = 3,14159$.

Перенеся начало координат в центр распределения m_x , и откладывая по оси абсцисс погрешность $\Delta x = x - m_x$, получим кривую нормального распределения погрешностей

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\Delta x^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (4.8)$$

Для группы из n наблюдений, распределённых по нормальному закону

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (4.9)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n-1}}. \quad (4.10)$$

Обсудим несколько свойств нормального распределения погрешностей.

Кривая нормального распределения погрешностей симметрична относительно оси ординат. Это означает, что погрешности, одинаковые по величине, но противоположные по знаку, имеют одинаковую плотность вероятностей, т.е. при большом числе наблюдений встречаются одинаково часто. Математическое ожидание случайной погрешности равно нулю.

Из характера кривой следует, что при нормальном законе распределения малые погрешности будут встречаться чаще, чем большие. Так, вероятность появления погрешностей, укладываемых в интервал от 0 до Δx_1 (рис. 4.7), характеризуемая площадью S_1 , будет значительно больше, чем вероятность появления погрешностей в интервале от Δx_2 до Δx_3 (площадь S_2).

На рис. 4.8 изображены кривые нормального распределения с различными средними квадратическими отклонениями, причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

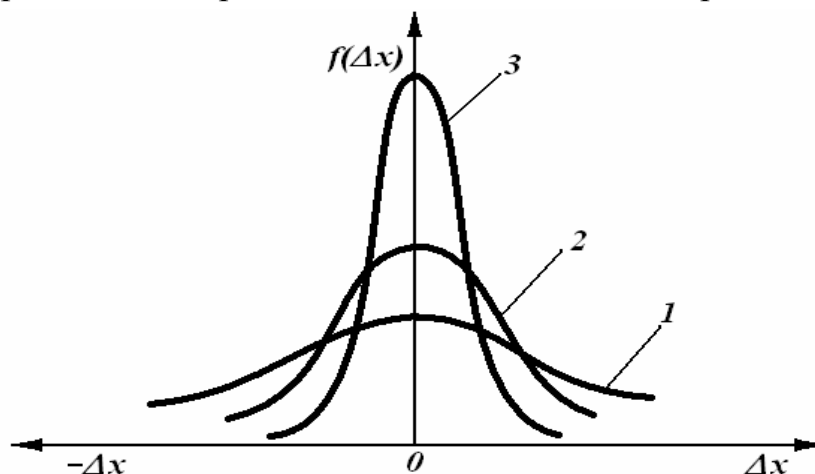


Рис. 4.8. Рассеяние результатов наблюдений

Сравнивая кривые между собой можно убедиться, что чем меньше СКО, тем меньше рассеяние результатов наблюдений и тем больше вероятность того, что большинство случайных погрешностей в них будет мало. Естественно заключить, что качество измерений тем выше, чем меньше СКО случайных погрешностей.

Если в формуле (4.3) вместо случайной величины ввести так называемую нормированную случайную величину

$$t = \frac{x - m_x}{\sigma}, \quad (4.11)$$

то она также будет распределена по нормальному закону с центром распределения m_x , абсцисса которого $m_x = 0$, а $s = 1$. Поэтому формулу (4.7), определяющую плотность вероятности, а также формулу функции распределения величины t можно записать так:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2}}; \quad (4.12)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Определенный интеграл с переменным верхним пределом, имеющий вид

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (4.13)$$

и определяющий значение площади под кривой плотности вероятности, называют функцией Лапласа.

Для нее справедливы следующие равенства:

$$\Phi(-\infty) = -0,5; \quad \Phi(0) = 0; \quad \Phi(+\infty) = 0,5; \quad \Phi(t) = -\Phi(-t).$$

Функция распределения $F(t)$ связана с функцией Лапласа формулой

$$F(t) = 0,5 + \Phi(t). \quad (4.14)$$

Эта формула позволяет при наличии таблицы значений $\Phi(t)$, соответствующих различным значениям t , рассчитать $F(t)$. Таблицы плотности вероятностей $f(t)$ и функции $\Phi(t)$ нормированной случайной величины, распределенной по нормальному закону, дают возможность найти плотность вероятности $f(x)$ и значения функции распределения $F(x)$ любой случайной величины, распределенной по нормальному закону, если известны значения ее центра распределения m_x и параметра σ .

Если случайная величина x принимает значения лишь в пределах некоторого конечного интервала от x_1 , до x_2 с постоянной плотностью вероятностей (рис. 4.9), то такое распределение называется равномерным и

описывается соотношениями

$$\begin{cases} f(x) = c, & \text{при } x_1 \leq x \leq x_2; \\ f(x) = 0, & \text{при } x < x_1 \text{ и } x > x_2. \end{cases} \quad (4.15)$$

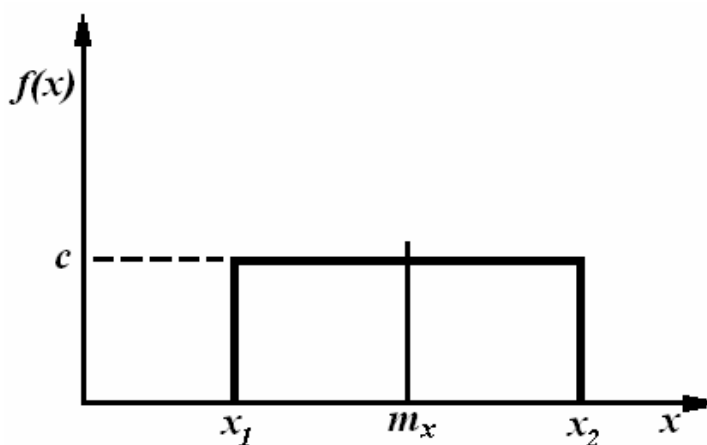


Рис. 4.9. Равномерное распределение случайной величины

4.5. Оценка случайных погрешностей. Доверительная вероятность и доверительный интервал

Для количественной оценки случайных погрешностей и установления границ случайной погрешности результата измерения могут использоваться: предельная погрешность, интервальная оценка, числовые характеристики закона распределения. Выбор конкретной оценки определяется необходимой полнотой сведений о погрешности, назначением измерений и характером использования их результатов. Комплексы оценок показателей точности установлены стандартами.

Предельная погрешность Δ_m – погрешность, больше которой в данном измерительном эксперименте не может появиться. Теоретически, такая оценка погрешности правомерна только для распределений, границы которых четко выражены и существует такое значение $\pm \Delta_m$, которое ограничивает возможные значения случайных погрешностей с обеих сторон от центра распределения (например, равномерное).

На практике такая оценка есть указание наибольшей погрешности, которая может встретиться при многократных измерениях одной и той же величины.

Недостатком такой оценки является то, что она не содержит информации о характере закона распределения случайных погрешностей. При арифметическом суммировании предельных погрешностей получаемая сумма может значительно превышать действительные погрешности.

Более универсальными и информативными являются квантильные оценки. Площадь, заключенная под всей кривой плотности распределения погрешностей, отражает вероятность всех возможных значений

погрешности и по условиям нормирования равна единице. Эту площадь можно разделить вертикальными линиями на части. Абсциссы таких линий называются квантилями. Так, на рис. 4.10 Δx_1 , есть 25%-ная квантиль, так как площадь под кривой $f(\Delta x)$ слева от нее составляет 25% всей площади. Абсцисса Δx_2 соответствует 75%-ной квантили. Между Δx_1 и Δx_2 заключено 50% всех возможных значений погрешности, а остальные лежат вне этого интервала.

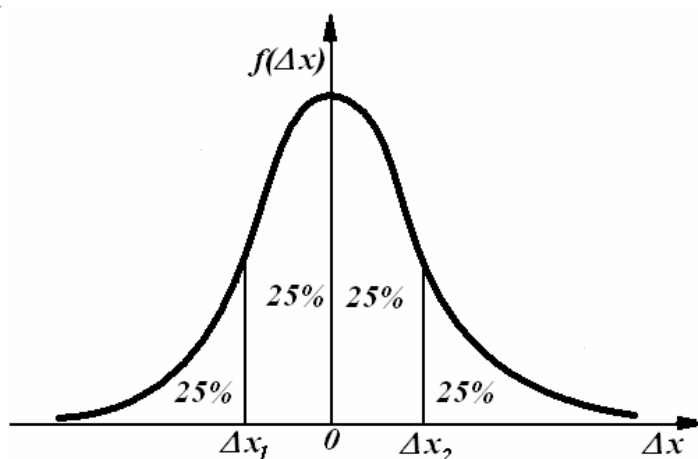


Рис. 4.10. Квантильные оценки случайной величины

Квантильная оценка погрешности представляется интервалом от $-\Delta x(P)$ до $+\Delta x(P)$, на котором с заданной вероятностью P встречаются $P \cdot 100\%$ всех возможных значений случайной погрешности. Интервал с границами $\pm \Delta x(P)$ называется *доверительным интервалом* случайной погрешности, между границами которого с заданной *доверительной вероятностью*

$$P\{x_H < x < x_B\} = 1 - q,$$

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

Принято границы доверительного интервала (доверительные границы) указывать симметричными относительно результата измерения.

В метрологической практике используют главным образом *квантильные оценки* доверительного интервала. Под P -процентным 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 .

Так как квантили, ограничивающие доверительный интервал погрешности могут быть выбраны различными, то при оценивании случайной погрешности доверительными границами необходимо одновременно указывать значение принятой доверительной вероятности (например, $\pm 0,3$ В при $P = 0,95$).

Доверительные границы случайной погрешности $\Delta x(P)$, соответствующие доверительной вероятности P , находят по формуле

$$\Delta x(P) = t \sigma, \quad (4.16)$$

где t – коэффициент, зависящий от P и формы закона распределения.

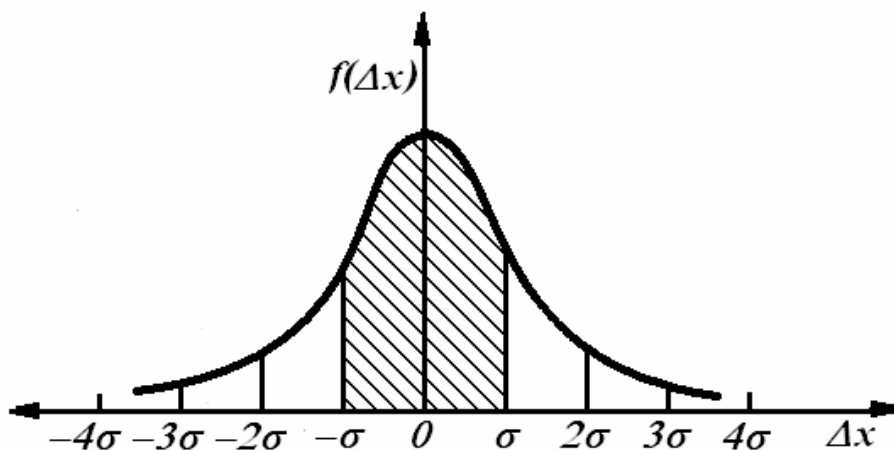


Рис. 4.11. К понятию доверительных интервалов

На графике нормального распределения погрешностей (рис. 4.11) по оси абсцисс отложены интервалы с границами $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$, $\pm 4\sigma$. Доверительные вероятности для этих интервалов приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Границы доверительных интервалов и соответствующие им доверительные вероятности

$t \sigma$	P
$\pm 1\sigma$	0,68
$\pm 2\sigma$	0,95
$\pm 3\sigma$	0,997
$\pm 4\sigma$	0,999

Как видно из этой таблицы, оценка случайной погрешности группы наблюдений интервалом $\pm 1\sigma$ соответствует доверительной вероятности 0,68. Такая оценка не дает уверенности в высоком качестве измерений, поскольку 32% от всего числа наблюдений может выйти за пределы указанного интервала, что совершенно неприемлемо при однократных измерениях и дезинформирует потребителя измерительной информации. Доверительному интервалу $\pm 3\sigma$ соответствует $P = 0,997$. Это означает, что практически с вероятностью очень близкой к единице ни одно из возможных значений погрешности при нормальном законе ее распределения не выйдет за границы интервала. Поэтому, при нормальном распределении погрешностей, принято считать случайную погрешность с границами $\pm 3\sigma$ предельной (максимально возможной) погрешностью. Погрешности, выходящие за эти границы, классифицируют как грубые или промахи.

В целях единообразия в оценивании случайных погрешностей интервальными оценками при технических измерениях доверительная вероятность принимается равной 0,95. Лишь для особо точных и ответственных измерений (важных, например, для безопасности и здоровья людей) допускается применять более высокую доверительную вероятность.

Итак, для получения интервальной оценки многократных наблюдений нормально распределенной случайной величины необходимо:

- определить точечные оценки МО и СКО $S_{\bar{x}}$ случайной величины по формулам (4.3) и (4.6) соответственно;
- выбрать доверительную вероятность P из рекомендуемого ряда значений 0,90; 0,95; 0,99;
- найти верхнюю x_B и нижнюю x_H границы в соответствии с уравнениями $F(x_H) = q/2 = 1 - P/2$ и $F(x_B) = 1 - q/2 = 1 + P/2$.

Значения x_H и x_B определяются из таблиц значений интегральной функции распределения $F(t)$ или функции Лапласа $\Phi(t)$.

Полученный доверительный интервал удовлетворяет условию

$$P \left\{ \bar{X} - z_p \frac{S_x}{\sqrt{n}} \leq x \leq \bar{X} + z_p \frac{S_x}{\sqrt{n}} \right\} = 2 \Phi(z_p), \quad (4.17)$$

где n – число измеренных значений; z_p – аргумент функции Лапласа $\Phi(t)$, отвечающей вероятности $P/2$. В данном случае z_p называется *квантильным множителем*. Половина длины доверительного интервала $\Delta x(P) = z_p \frac{S}{\sqrt{n}}$ называется *доверительной границей погрешности* результата измерений.

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

Рассмотренный способ нахождения доверительных интервалов справедлив для достаточно большого числа наблюдений n , когда $\sigma = S_x$. Следует помнить, что вычисляемая оценка СКО S_x является лишь некоторым приближением к истинному значению σ . Определение доверительного интервала при заданной вероятности оказывается тем менее надежным, чем меньше число наблюдений.

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

$$t = \frac{\bar{X} - m_x}{S_{\bar{x}}} = \frac{\bar{X} - Q}{S_{\bar{x}}} = \sqrt{n} \frac{\bar{X} - Q}{S_x},$$

где Q – истинное значение измеряемой величины. Величины 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 $[-t_p; +t_p]$,

$$\begin{aligned} P \left\{ -t_p \leq \frac{\bar{X} - Q}{S_{\bar{x}}} \leq +t_p \right\} &= P \left\{ |\bar{X} - Q| \leq \frac{t_p S_x}{\sqrt{n}} \right\} = \\ &= \int_{-t_p}^{+t_p} S(t, k) dt = 2 \int_{-t_p}^{+t_p} S(t, k) dt, \end{aligned} \quad (4.18)$$

где k – число степеней свободы, равно $(n-1)$. Величины t_p (называемые коэффициентами Стьюдента), рассчитанные с помощью двух последних формул для различных значений доверительной вероятности и числа измерений, табулированы. Следовательно, с помощью распределения Стьюдента можно найти вероятность того, что отклонение среднего арифметического от истинного значения измеряемой величины не превышает $\Delta x(P) = \varepsilon = \pm t_p S_{\bar{x}} = \pm t_p \frac{S_x}{\sqrt{n}}$, ε – половина длины доверительного интервала, или доверительная граница погрешности измерений.

В тех случаях, когда распределение случайных погрешностей не является нормальным, все же часто пользуются распределением Стьюдента с приближением, степень которого остается неизвестной. Распределение Стьюдента применяют при числе измерений $n < 30$, поскольку уже при $n = 20, \mathbf{K}, 30$ оно переходит в нормальное и вместо уравнения (4.18) можно использовать уравнение (4.17). Результат измерения записывается в виде:

$$Q = \bar{X} \pm t \frac{S_x}{\sqrt{n}}; \quad P = P_D,$$

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 \bar{X} вовсе не предполагает, что истинное

значение находится ближе к нему, чем к остальным точкам интервала. Оно может находиться в любом месте интервала, а с вероятностью $1 - P_D$ даже вне его.

Недостатком оценивания случайной погрешности доверительным интервалом при произвольно выбираемых доверительных вероятностях является невозможность суммирования нескольких погрешностей, так как доверительный интервал суммы не равен сумме доверительных интервалов. В то же время необходимость в суммировании случайных погрешностей существует, когда нужно оценить погрешность суммированием ее составляющих, подчиняющихся к тому же разным законам распределения.

В теории вероятностей показано, что суммирование статистически независимых случайных величин осуществляется путем суммирования их дисперсий

$$D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n D_i, \\ s_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2}. \quad (4.19)$$

Таким образом, для того чтобы отдельные составляющие случайной погрешности можно было суммировать расчетным путем, они должны быть представлены своими СКО, а не предельными или доверительными границами.

Формула (4.19) правомерна только для некоррелированных случайных величин. В том случае, когда суммируемые составляющие погрешности коррелированы, расчетные соотношения усложняются, так как требуется учет корреляционных связей. Методы выявления корреляционных связей и их учет являются предметом изучения в теории вероятностей [2, 4, 7, 12].

Рассмотренные свойства распределений следует понимать как «идеальные», полученные на основе бесконечно большого числа опытов. В реальных условиях результат измерения получают либо путем обработки ограниченной группы наблюдений, либо на основе однократного измерения. Правила обработки данных для получения оценок результата и погрешности статистических измерений определены стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений.

4.6. 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 ошибки, допущенные оператором во время измерений. К ним можно отнести:

- неправильный отсчет по шкале измерительного прибора, происходящий из-за неверного учета цены малых делений шкалы;
- неправильная запись результата наблюдений, значений отдельных мер использованного набора, например гирь.

Грубые погрешности, как правило, возникают при однократных измерениях и обычно устраняются путем повторных измерений. Их причинами могут быть внезапные и кратковременные изменения условий измерения или оставшиеся незамеченными неисправности в аппаратуре.

Корректная статистическая обработка выборки возможна только при ее однородности, т.е. в том случае, когда все ее члены принадлежат к одной и той же генеральной совокупности. В противном случае обработка данных бессмысленна. «Чужие» отсчеты по своим значениям могут существенно не отличаться от «своих» отсчетов. Их можно обнаружить только по виду гистограмм или дифференциальных законов распределения. Наличие таких аномальных отсчетов принято называть загрязнением выборки, однако выделить члены выборки, принадлежащие каждой из генеральных совокупностей, практически невозможно.

Если «свои» и «чужие» отсчеты различаются по значениям, то их исключают из выборки. Особую неприятность доставляют отсчеты, которые хотя и не входят в компактную группу основной массы отсчетов выборки, но и не удалены от нее на значительное расстояние, – так называемые предполагаемые промахи. Отбрасывание «слишком» удаленных от центра выборки отсчетов называется *цензурированием* выборки. Это осуществляется с помощью специальных критериев.

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 отсчетов. 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 определенными 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 «трех сигм» применяется для результатов измерений, распределенных по нормальному закону. По этому критерию считается, что результат, возникающий с вероятностью $q < 0,003$, мало вероятен и его можно считать промахом, если $|\bar{X} - x_i| > 3S_x$, где S_x – оценка СКО измерений. Величины \bar{X} и S_x вычисляют без учета экстремальных значений x_i . Данный критерий надежен при числе измерений $n \geq 20 \dots 50$.

Это правило обычно считается слишком жестким, поэтому рекомендуется назначать границу цензурирования в зависимости от объема выборки: при $6 < n \leq 1000$ она равна $4S_x$; при $100 < n \leq 10000$ – $4,5S_x$; при $1000 < n \leq 100000$ – $5S_x$. Данное правило также используется только при нормальном распределении.

Критерий Романовского применяется в случае, если число измерений $n < 20$. При этом вычисляется отношение $\left| \frac{x_i - \bar{X}}{S_x} \right| = v$ и сравнивается с критерием v_p , выбранным по таблице при заданном уровне значимости (см. Приложение 3). Если $v \geq v_p$, то результат x_i считается промахом и отбрасывается.

Вариационный критерий Диксона – удобный и достаточно мощный (с малыми вероятностями ошибок). При его применении полученные результаты наблюдений записывают в вариационный возрастающий ряд $x_1, x_2, \mathbf{K}, x_n$ ($x_1 < x_2 < \mathbf{K} < x_n$).

Критерий Диксона определяется как

$$K_D = (x_n - x_{n-1}) / (x_n - x_1).$$

Критическая область для этого критерия $P(K_D > Z_q) = q$. Значения Z_q приведены в таблице 4.3 [27].

Таблица 4.3

Значения критерия Диксона

n	Z_q при q			
	0,10	0,05	0,02	0,01
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 осмотрительности и учета объективных условий измерений. Конечно, оператор должен исключить результат наблюдения с явной грубой погрешностью и выполнить новое измерение. Но он не имеет права отбрасывать более или менее резко отличающиеся от других результаты наблюдений. В сомнительных случаях лучше сделать дополнительные измерения (не взамен сомнительных, а кроме них) и затем привлекать на помощь рассмотренные выше статистические критерии. Кроме рассмотренных критериев существуют и другие, например критерии Граббса и Шовенэ [6, 18, 27, 29].

4.7. Обработка результатов прямых многократных измерений

Прямые многократные измерения делятся на равноточные и неравноточные. Теоретические основы и методика объединения результатов неравноточных измерений подробно рассмотрены в [1, 10, 14, 15]. *Равноточными* называются измерения, которые проводятся средствами измерений одинаковой точности по одной и той же методике при неизменных внешних условиях. При равноточных измерениях СКО результатов всех рядов измерений равны между собой.

Задача обработки результатов многократных измерений заключается в нахождении оценки измеряемой величины и доверительного интервала, в котором находится ее истинное значение. Обработка должна проводиться в соответствии с ГОСТ 8.207–76 «ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Общие положения».

Исходной информацией для обработки является ряд из n ($n > 4$) результатов измерений x_1, x_2, \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 \bar{X} измеряемой величины по формуле (4.3);
- оценка СКО результата измерения S_x по формуле (4.5);
- оценка СКО среднего арифметического значения $S_{\bar{x}}$ по формуле (4.6).

В соответствии с критериями, рассмотренными выше, исключаются грубые погрешности и промахи. После их исключения проводится повторный расчет среднего арифметического значения и оценок его СКО.

2. Определение закона распределения результатов измерений или случайных погрешностей измерений. В последнем случае от выборки результатов измерений $x_1, x_2, \mathbf{K}, x_n$ переходят к выборке отклонений от среднего арифметического $\Delta x_1, \Delta x_2, \mathbf{K}, \Delta x_n$, где $\Delta x_i = x_i - \bar{X}$.

Первым шагом при идентификации закона распределения является построение по исправленным результатам измерений x_i , где $i = 1, 2, \mathbf{K}, n$, вариационного ряда (упорядоченной выборки) 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 минимальным искажением от сглаживания самой кривой искомого распределения.

Далее определяют интервалы группирования экспериментальных данных в виде $\Delta_1 = (y_1, y_1 + h)$; $\Delta_2 = (y_1 + h, y_1 + 2h)$; \mathbf{K} ; $\Delta_m = (y_n - h, y_n)$ и подсчитывают число попаданий n_k (частоты) результатов измерений в каждый интервал группирования. Сумма частот 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 $k = 1, 2, \mathbf{K}, m$.

Проведенные расчеты позволяют построить гистограмму, полигон и кумулятивную кривую. Для построения гистограммы по оси результатов наблюдений x (рис. 4.12, а) откладываются интервалы Δ_k в порядке возрастания номеров и на каждом интервале строится прямоугольник высотой p_k .

Площадь, заключенная под графиком, пропорциональна числу наблюдений n . Иногда высоту прямоугольника откладывают равной 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 расчетное симметрирование гистограммы, методика которого приведена в [17].

Полигон представляет собой ломаную кривую, соединяющую середины верхних оснований каждого столбца гистограммы (см. рис. 4.12, а). 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 частот).

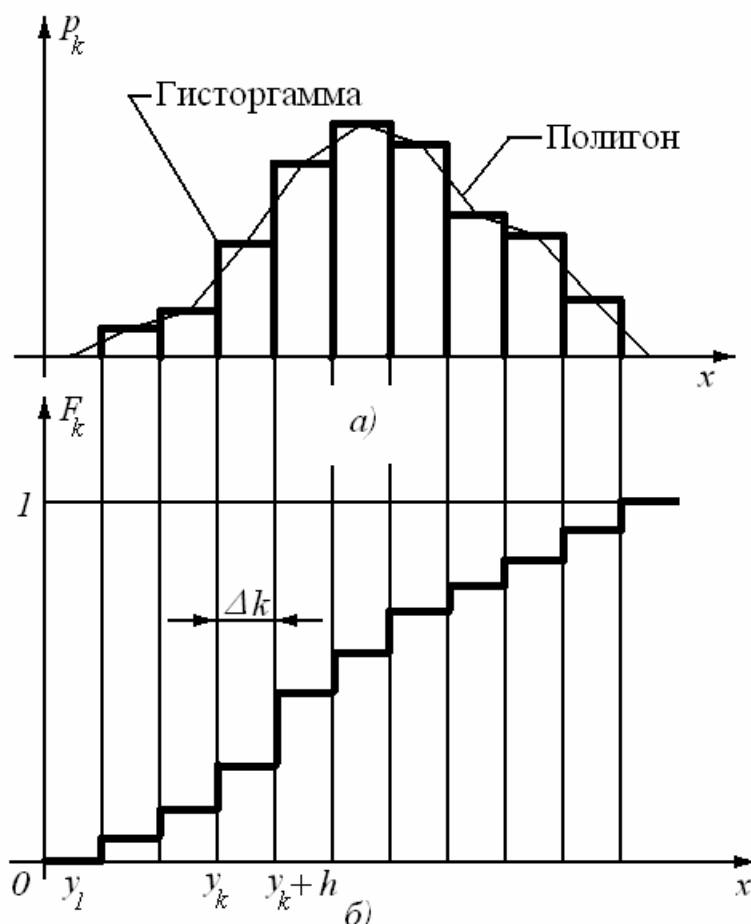


Рис. 4.12. Гистограмма, полигон (а) и кумулятивная кривая (б)

Кумулятивная кривая – это график статистической функции распределения. Для ее построения по оси результатов наблюдений (рис. 4.12, б) откладывают интервалы Δ_k в порядке возрастания номеров и на каждом интервале строят прямоугольник высотой

$$F_k = \sum_{k=1}^k p_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^k n_k.$$

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

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

3. Оценка закона распределения по статистическим критериям. При числе наблюдений $n > 50$ для идентификации закона распределения используется критерий Пирсона χ^2 (хи-квадрат) или критерий Мизеса–

Смирнова (ω^2). При $50 > n > 15$ для проверки нормальности закона распределения применяется составной критерий (d-критерий), приведенный в ГОСТ 8.207–76. При $n < 15$ принадлежность экспериментального распределения к нормальному не проверяется.

4. Определение доверительных интервалов 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 $\Delta = \pm z_p S_{\bar{x}}$.

5. 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 по определенным правилам. Доверительная вероятность при определении границ Θ принимается равной доверительной вероятности, используемой при нахождении границ случайной погрешности.

6. Определение доверительной границы погрешности результата измерения D_p . Данная операция осуществляется путем суммирования СКО случайной составляющей $S_{\bar{x}}$ и границ неисключенной систематической составляющей Θ в зависимости от соотношения $\frac{\Theta}{S_{\bar{x}}}$.

Анализ соотношения между неисключенной систематической погрешностью и случайной погрешностью показывает, что если $\frac{\Theta}{S_{\bar{x}}} < 0,8$, то неисключенной систематической погрешностью можно пренебречь и принять границы погрешности результата равным $\Delta = \pm t_p S_{\bar{x}}$ (t_p – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности P и числа проведенных измерений n). Если $\frac{\Theta}{S_{\bar{x}}} > 8$, то случайной погрешностью можно пренебречь и принять границы погрешности результата равным $\Delta = \pm \Theta$.

Если оба неравенства не выполняются, вычисляют СКО результата как сумму неисключенной систематической погрешности и случайной составляющей:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3} + S_{\bar{x}}^2}.$$

Границы погрешности результата измерения в этом случае вычисляются по формуле

$$\Delta = \pm K S_{\Sigma}.$$

Коэффициент K вычисляют по эмпирической формуле

$$K = \frac{t_p S_{\bar{x}} + \Theta}{S_{\bar{x}} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\Theta_i^2}{3}}}.$$

7. Запись результата измерения. Результат измерения записывается в виде $x = \bar{X} + \Delta_p$ при доверительной вероятности $P = P_D$. При отсутствии данных о функциях распределения составляющих погрешности результаты измерений представляют в виде $\bar{X}; S_{\bar{x}}; n; \Theta$ при доверительной вероятности $P = P_D$.

4.8. Контрольные вопросы

1. Назовите наиболее универсальные способы описания случайных величин.
2. Опишите формирование закона распределения плотности вероятностей случайной величины.
3. Запишите условие нормирования дифференциального закона распределения случайной величины.
4. Запишите вероятность P попадания случайной величины x в интервал от x_1 до x_2 при известном дифференциальном законе распределения $f(x)$.
5. Дайте определение интегральной функции распределения, приведите ее график и перечислите основные свойства.
6. Поясните суть различных способов нахождения центра распределения случайной величины.
7. Какие способы нахождения центра распределения случайной величины наиболее чувствительны к наличию промахов.
8. Запишите формулы для начальных и центральных моментов распределений дискретных и непрерывных случайных величин.
9. Что характеризует дисперсия случайной величины?
10. Определите точечную оценку математического ожидания случайной величины.
11. Является ли точечная оценка дисперсии несмещенной и состоятельной. Приведите формулу для точечной оценки дисперсии.

12. Приведите формулу для оценки СКО. Как связаны СКО и рассеяние результатов наблюдений?
13. Определите характеристики нормального закона распределения, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей. Приведите формулу для распределения Гаусса.
14. Перечислите виды распределений случайных величин, для числовых оценок которых можно использовать предельную погрешность.
15. Дайте определение квантильной оценки погрешности.
16. Что означает утверждение, что доверительному интервалу $\pm 3\sigma$ соответствует доверительная вероятность $P = 0,997$?
17. Каким образом осуществляется суммирование статистически независимых отдельных составляющих случайных погрешностей?
18. В чем заключается недостаток оценивания случайных погрешностей доверительным интервалом?
19. Дайте определение понятию грубая погрешность. Назовите причины её возникновения.
20. Поясните суть критериев выявления грубых погрешностей: критерий «трех сигм», критерий Романовского, вариационный критерий Диксона.

РАЗДЕЛ 5. ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ. ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

5.1. Воспроизведение единиц физических величин и передача их размеров. Единство измерений

При проведении измерений необходимо обеспечить их единство.

Единство измерений – состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы.

Понятие «единство измерений» довольно емкое. Оно охватывает важнейшие задачи метрологии: унификацию единиц ФВ, разработку систем воспроизведения величин и передачи их размеров рабочим средствам измерений с установленной точностью и ряд других вопросов. Единство измерений должно обеспечиваться при любой точности, необходимой науке и технике. На достижение и поддержание на должном уровне единства измерений направлена деятельность государственных и ведомственных метрологических служб, проводимая в соответствии с установленными правилами, требованиями и нормами. На государственном уровне деятельность по обеспечению единства измерений регламентируется стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) или нормативными документами органов метрологической службы.

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

Воспроизведение единицы физической величины – совокупность операций по материализации единицы ФВ с помощью государственного эталона. Различают воспроизведение основной и производной единиц.

Воспроизведение основной единицы – это создание фиксированной по размеру ФВ в соответствии с определением единицы. Оно осуществляется с помощью государственных первичных эталонов. 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 [25].

Воспроизведение производной единицы – это определение значения ФВ в указанных единицах на основании измерений других величин, функционально связанных с измеряемой величиной.

Передача размера единицы – приведение размера единицы ФВ, хранимой поверяемым средством измерения, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при их поверке или калибровке. Размер единицы передается «сверху вниз», от более точных средств измерения к менее точным.

Хранение единицы – совокупность операций, обеспечивающая неизменность во времени размера единицы, присущего данному средству измерения. Хранение эталона единицы ФВ 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 ее размера.

5.2. Эталоны единиц физических величин

5.2.1. Классификация эталонов

Технической основой обеспечения единства измерений является эталонная база.

Эталон – средство измерений (или их комплекс), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИ и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке. Классификация, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению устанавливает ГОСТ 8.057-80 «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения» [19].

Перечень эталонов не повторяет перечня принятых ФВ. Для ряда единиц эталоны не создаются. Это происходит в том случае, когда нет возможности непосредственно сравнивать соответствующие ФВ. Например, нет необходимости в эталоне площади, так как она не поддается непосредственному сравнению.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной ФВ и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя тесно связанными друг с другом признаками: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью [21].

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

Реализация этих требований привела к идее создания «естественных эталонов» различных величин, основанных на естественных физических постоянных.

Воспроизводимость – возможность воспроизведения единицы ФВ (на основе ее теоретического определения) с наименьшей погрешностью для данного уровня развития измерительной техники. Это достигается путем 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.

Поверка СИ – установление органом государственной метрологической службы пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям.

Поверке подвергают средства измерений, подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору.

При поверке используют эталон. Поверку проводят в соответствии с обязательными требованиями, установленными нормативными документами по поверке. Поверку проводят специально обученные специалисты, аттестованные в качестве поверителей органами Государственной метрологической службы.

Результаты поверки средств измерений, признанных годными к применению, оформляют выдачей *свидетельства о поверке*, нанесением *поверительного клейма* или иными способами, установленными нормативными документами по поверке.

Другими официально уполномоченными органами, которым может быть предоставлено право проведения поверки, являются аккредитованные метрологические службы юридических лиц. *Аккредитация на право поверки средств измерений* проводится уполномоченным на то государственным органом управления [24].

Калибровка СИ – совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения действительных метрологических характеристик этого средства измерений.

Калибровке могут подвергаться средства измерений, не подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору.

Результаты калибровки позволяют определить действительные значения измеряемой величины, показываемые средством измерений, или поправки к его показаниям, или оценить погрешность этих средств. При калибровке могут быть определены и другие метрологические характеристики.

Результаты калибровки средств измерений удостоверяются *калибровочным знаком*, наносимым на средства измерений, или *сертификатом о калибровке*, а также записью в эксплуатационных документах. Сертификат о калибровке представляет собой документ, удостоверяющий факт и результаты калибровки средства измерений, который выдается организацией, осуществляющей калибровку [24].

Различают следующие виды эталонов:

Международный эталон – эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами.

Первичный эталон – обеспечивает воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью.

Государственный первичный эталон – первичный эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории государства.

Вторичный эталон – эталон, получающий размер единицы непосредственно от первичного эталона данной единицы.

Эталон сравнения – эталон, применяемый для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

Рабочий эталон – эталон, предназначенный для передачи размера единицы рабочим средствам измерений.

Рабочее средство измерений – средство измерений, предназначенное для измерений, не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерений.

Эталонная база страны – совокупность государственных первичных и вторичных эталонов, являющаяся основой обеспечения единства измерений в стране.

Структура эталонной базы России, являющаяся технической основой обеспечения единства измерений, представлена на рис. 5.1.

В международной практике государственные эталоны обычно называются национальными, а эталоны, хранимые в Международном бюро мер и весов, международными. Термин «национальный эталон» применяют в случаях проведения сличения эталонов, принадлежащих отдельным государствам, с международным эталоном или при проведении так называемых круговых сличений эталонов ряда стран. Например, национальные эталоны Килограмма

сличаются один раз в 20-25 лет, а эталоны Вольты и Ома и ряд других сличаются раз в три года.



Рис. 5.1. Структура эталонной базы Российской Федерации

К первичным эталонам относят как соответствующие эталоны основных СИ, так и производных единиц СИ.

Размер единицы, воспроизводимой вторичными эталонами, «поддерживается» с помощью первичных (государственных).

Вторичные эталоны утверждаются в зависимости от особенностей их применения Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии или государственными научными метрологическими центрами.

Рабочие эталоны получают размер единицы, как правило, от вторичного эталона и служат для передачи размера единиц другим рабочим эталонам (меньшей точности) и рабочим средствам измерений.

До 1994 года в нашей стране применялся термин «образцовое средство измерений», которое служило промежуточным метрологическим звеном, расположенным между эталоном и рабочим средством измерений. С целью приближения российской терминологии к международной, было принято решение именовать «образцовые средства измерений» рабочими эталонами. Поскольку образцовые средства измерений в зависимости от точности подразделялись на разряды от 1-го (более высокой точности) до 3-го, а иногда даже до 4-го разряда (наименьшей точности), то такие же разряды были приняты и для рабочих эталонов.

На рис. 5.2. представлена классификация эталонов. Высшим звеном эталонной базы страны является система государственных первичных эталонов, которые воспроизводят и (или) хранят единицы и передают их размеры подчиненным эталонам, которые, в свою очередь, передают их рабочим средствам измерений.

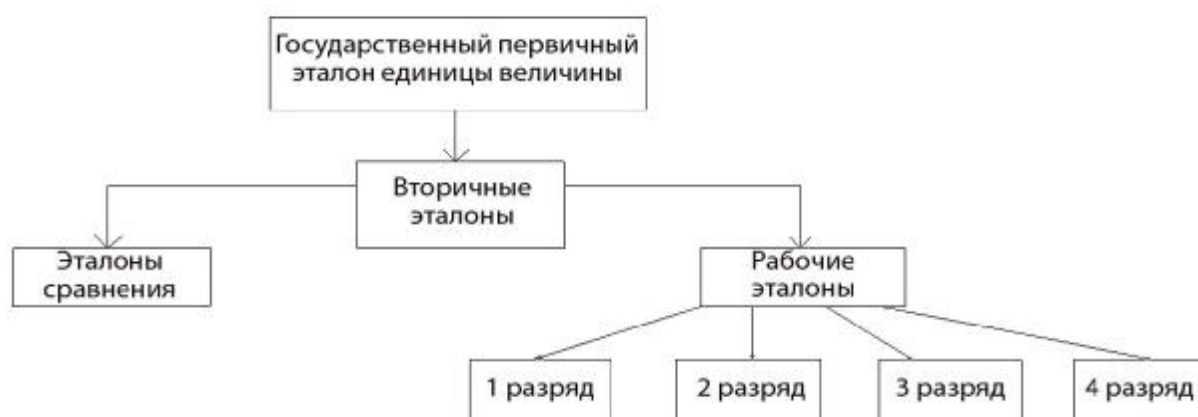


Рис. 5.2. Классификация эталонов

В СССР имелось 145 государственных первичных эталонов, а сама эталонная база была признана в мире одной из самых полных систем эталонов с уникальными возможностями по условиям применения, широкими диапазонами измерений и высокими точностями.

В настоящее время в Российской Федерации 123 государственных первичных эталона, из них 6 эталонов основных единиц (рис. 5.3.) [3].



Рис. 5.3. Основные единицы величин и институты-хранители государственных первичных эталонов

Эталон единицы длины – метра – включает источники эталонного излучения $He - Ne / J^2$ – лазеры, стабилизированные по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде-127, установку для измерения отно-

шений длин волн источников излучения и интерференционный компаратор с лазерным интерференционным рефрактометром. Метр определен как – длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299\,792\,458$ доли секунды (точно).

Эталон единицы массы – *килограмм* – представляет собой цилиндр из сплава платины (90%) и иридия (10%), у которого диаметр и высота примерно одинаковы (около 39 мм).

Эталон единицы времени – *секунда* – соответствует определению секунды как интервала времени, в течение которого совершается 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями ($F = 4, m_F = 0$ и $F = 3, m_F = 0$) основного состояния атома цезия-133 в отсутствии внешних полей.

Эталон единицы силы постоянного электрического тока – *ампер* – состоит из двух комплексов: в первом используется способ воспроизведения размера единицы силы тока (1 мА и 1 А) с использованием косвенных измерений силы тока $I = U/r$, причем размер единицы электрического напряжения U – вольт – воспроизводится с помощью квантового эффекта Джозефсона, а размер единицы электрического сопротивления r – Ом – с помощью квантового эффекта Холла; во втором комплексе, воспроизводящем силу постоянного тока в диапазоне 10^{-16} К 10^{-9} А, используется многозначная мера силы тока, включающая меру линейно изменяющегося электрического напряжения с набором герметизированных конденсаторов, прибор для измерения напряжения, прибор для измерения времени и компенсирующее устройство. Ампер определен как – сила не изменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии 1 м один от другого в вакууме вызвал бы между этими проводниками силу взаимодействия равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Эталон единицы температуры – *один градус Кельвина* – определен как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Тройная точка воды (273,16 К – равновесие между газообразной (насыщенный газ), жидкой (вода) и твердой (лед) фазами воды) может быть воспроизведена с погрешностью $0,0001^\circ\text{C}$ и выше температуры таяния льда – $0,01^\circ\text{C}$.

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

Единица количества вещества – *моль* – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько атомов содержится в углероде-12 массой 0,012 кг (1 моль углерода имеет массу 0,002 кг, 1

моль кислорода – 0,032 кг, а 1 моль воды – 0,018 кг). К настоящему времени ни в одной метрологической лаборатории мира эталон моля не создан. На пути создания такого эталона встали большие теоретические проблемы, одной из которых является недостаточная четкость определения этой единицы. В настоящее время проводятся теоретические и экспериментальные исследования на основе квантовой теории с целью создания эталона единицы количества вещества на базе фундаментальных физических констант [25].

В соответствии с Конституцией Российской Федерации и законом Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» государственные эталоны находятся в ведении Российской Федерации (ранее функции собственника выполнял Госстандарт России, ныне – Ростехрегулирование). Сегодня в России 7 специализированных научно-исследовательских организаций, определенных в качестве национальных метрологических институтов и подведомственных Ростехрегулированию (рис. 5.4.)

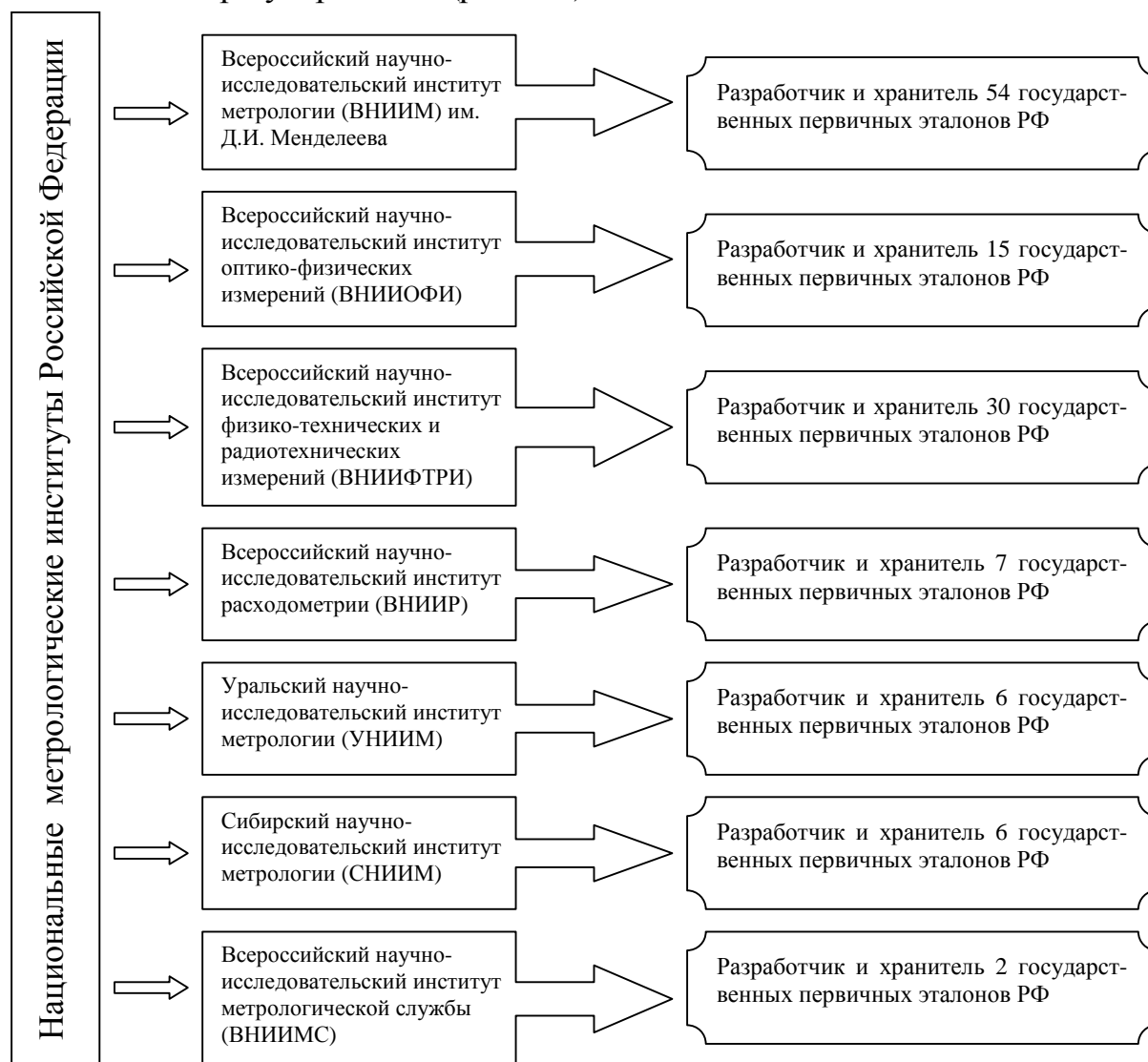


Рис. 5.4. Национальные метрологические институты РФ

5.2.2. Примеры построения эталонов основных единиц

Эталон единицы длины. В 1791 г. Национальное собрание Франции приняло длину десятиmillionной части четверти дуги парижского меридиана в качестве единицы длины – метра.

Но уже в 1837 г. французские ученые установили, что в четверти меридиана содержится не 10 000 000 м, а 10 000 856 м. Кроме того, примерно в тот же период времени стало очевидным, что форма и размеры Земли со временем, пусть незначительно, но изменяются. Поэтому в 1872 г. по инициативе Петербургской академии наук была создана международная комиссия, решившая не создавать уточненных эталонов метра, а принять в качестве исходной единицы длины метр Архива Франции.

В 1889 г. во Франции был изготовлен 31 эталон метра в виде платиноиридиевого стержня X-образного поперечного сечения (рис. 5.5.).

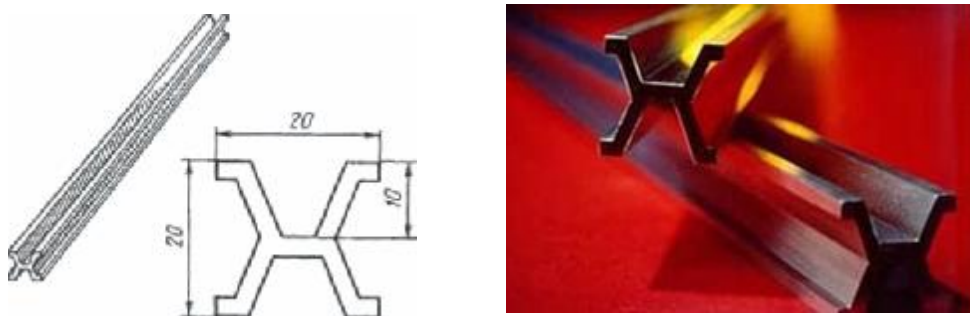


Рис. 5.5. Эталон единицы длины

Эталон № 6 оказался при 0°С точно равным длине метра Архива и был принят в 1889 г. Первой Генеральной конференцией по мерам и весам в качестве международного прототипа метра. Остальные 30 эталонов были переданы различным странам. Экземпляры № 11, № 28 в 1889 г. были переданы России, при этом экземпляр № 28 был утвержден в качестве государственного эталона России. Погрешность платиноиридиевых штриховых мер составляет $\pm 1,1 \cdot 10^{-7}$ м. Так как штрихи имели значительную ширину, существенно повысить точность эталона было невозможно.

Требования к повышению точности эталона единицы длины и его физической воспроизводимости привело к тому, что в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам было принято новое определение метра: «Метр – длина, равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2P_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86» (рис. 5.6.). Погрешность воспроизведения метра с помощью данного эталона составила $5 \cdot 10^{-9}$ м.

Повышение точности эталона длины стало возможным при разработке высокостабильных лазеров, что позволило уточнить значение скорости света. В 1983 г. XVII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение метра: «Метр – длина пути, проходимого светом в вакууме за промежуток времени равный $1/c$, где $c=299\,792\,458$ м/с – скорость света, принятая как постоянная неизменная величина».

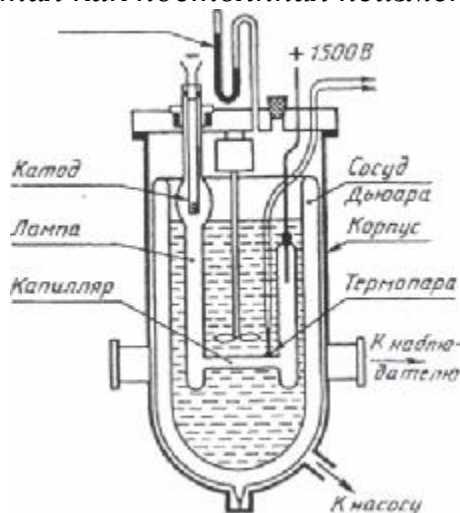


Рис. 5.6. Эталон единицы длины (1960 г.)

9-я сессия Консультативного комитета по определению метра в сентябре 1997 г. приняла рекомендацию С1 (1997), в которой приведен перечень рекомендованных частот и длин волн излучений в вакууме; одной из рекомендованных линий является поглощающая линия молекулы $^{127}\text{J}_2$, переход 11-5, вращательной линии R(127), компонента a_{13} (или i), для которой установлены следующие значения:

$$F = 473\,612\,214\,705 \text{ кГц}$$

$$l = 632,99139822 \text{ нм}$$

с относительной неопределенностью $2,5 \cdot 10^{-11}$. Эти значения относятся к He-Ne лазеру с внутрирезонаторной ячейкой поглощения с использованием метода стабилизации по 3-ей гармонике.

Согласно Рекомендации (МК-1983) Международного комитета мер и весов воспроизведение метра может осуществляться одним из следующих методов:

- а) через длину L , пути, проходимого в вакууме плоской электромагнитной волной за время t ; эта длина получается путем измерения промежутка времени при использовании соотношения $L = c \cdot \Delta t$ и значения скорости света в вакууме $299\,792\,458$ м/с;
- б) через значение длины волны в вакууме l плоской электромагнитной волны с частотой f ; это значение длины волны получается путем измерения значения частоты f при использовании соотношения $L = c \cdot f$ и значения скорости света в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с.

В настоящее время Государственный первичный эталон единицы длины ГЭТ 2-85, воспроизводящий одну из основных единиц физических величин – метр, находится во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (рис.5.7.).

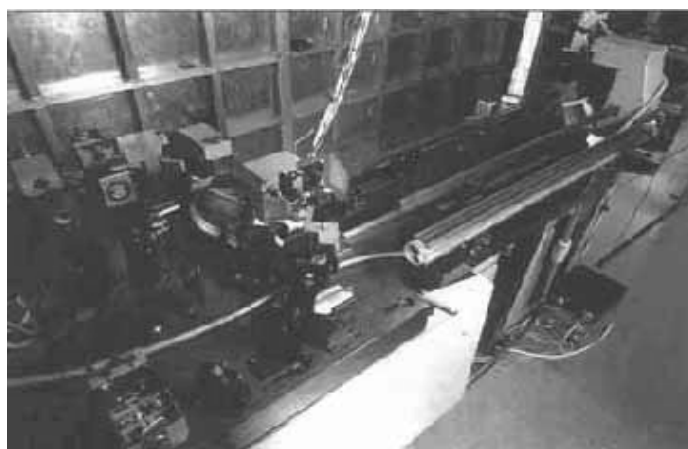


Рис. 5.7. Государственный первичный эталон единицы длины

Важной особенностью первичного эталона метра, в состав которого входит стабилизированный по частоте $He - Ne / J^2$ лазер, является воспроизведение и хранение единицы длины на основе стабильного квантового эффекта – перехода на линиях сверхтонкой структуры молекулярного йода $^{127}J_2$.

Состав эталона

Эталон состоит из комплекса следующих средств измерений:

- источники эталонного излучения $He - Ne / J^2$ – лазеры, стабилизированные по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127;
- установка для измерения отношений длин волн источников излучения;
- интерференционный компаратор с лазерным интерференционным рефрактометром.

Метрологические характеристики эталона

Диапазон измерений длины – $(5 \cdot 10^{-9} - 1,0)$ м.

Длина волны, воспроизводимая эталонным источником излучения

$He - Ne / J^2$ лазера – $0,63299139822$ мкм.

Эталон обеспечивает воспроизведение единицы длины с СКО – $2 \cdot 10^{-11}$ и НСП – $1,5 \cdot 10^{-11}$.

Эталонный комплекс обеспечивает передачу размера единицы длины вещественным мерам длины, измерителям линейных перемещений, преобразователям линейных перемещений:

- в диапазоне $(1 \cdot 10^{-3} - 1,0)$ м с суммарной погрешностью $(0,015 + 0,01 L)$ мкм, где L , – длина в метрах;

- в диапазоне $(1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-3})$ м с суммарной погрешностью 0,015 мкм;
- в диапазоне $(5 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-6})$ м с суммарной погрешностью 0,003 мкм.

Уникальность

Наивысшая точность воспроизведения единицы длины – 10^{-11} .

Наибольшее разрешение лазерного интерферометра – $1 / 2000 \approx 0,3$ нм.

Специальный пассивный термобаростат и специальный виброзащитный фундамент компаратора.

Эталон единицы длины имеет постоянные международные сличения с эталоном Международного Бюро мер и весов (МБМВ) и Национальными эталонами Финляндии, Германии, Норвегии, Чехии, США, Англии, Республики Корея.

Эталон единиц массы. В основе эталона единицы массы лежит принцип независимости законов механики от выбора единицы массы. Поэтому условно по договоренности за единицу массы принята масса Международного прототипа килограмма, представляющего собой прямой цилиндр с диаметром и высотой 39 мм. Международный прототип килограмма изготовлен из платиноиридиевого сплава (90% Pt, 10% Ir). Его масса близка к массе одного кубического дециметра дистиллированной воды при температуре около $+3,96$ °С и нормальном атмосферном давлении 760 мм рт.ст.

Международный прототип килограмма хранится и применяется в Международном бюро мер и весов (МБМВ). Передача размера единицы массы от Международного прототипа килограмма национальным эталонам единицы массы осуществляется в МБМВ с наивысшей точностью, достигнутой в мире.

Наивысшая достижимая точность измерений массы определяется, прежде всего, стабильностью Международного прототипа килограмма и точностью передачи единицы массы национальным эталонам килограмма.

Основные работы по созданию национального эталона единицы массы в России были проведены Д.И. Менделеевым после получения из МБМВ платиноиридиевых копий № 12 и № 26 и эталонных весов № 1 фирмы «Рупрехт» в 1895 году.

Все работы, проводимые с эталонами, связаны с повышением точности передачи размера единицы массы от платиноиридиевой копии № 12 эталонам-копиям и рабочим эталонам массы из нержавеющей стали. При этом одной из основных работ является повышение точности эталонных весов, компараторов.

Единство и точность измерений массы в России обеспечивается применением Государственного первичного эталона единицы массы, образцовых и рабочих средств измерения массы в соответствии с ГОСТ 8.021-84 «Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений массы».

Государственный первичный эталон (ГПЭ) единицы массы предназначен для воспроизведения и хранения единицы массы, полученной на основании его сличения с Международным прототипом килограмма, а также для передачи размера единицы массы при помощи вторичных эталонов и образцовых средств измерения массы рабочим средствам измерения.

Российский Государственный первичный эталон единицы массы имеет номер ГЭТ 3-78 по государственному реестру и утвержден Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам № 4109 от 6 декабря 1984 г.

В Государственный первичный эталон единицы массы входит комплекс следующих средств измерений (рис. 5.8.):

- национальный прототип килограмма – копия № 12 Международного прототипа килограмма;
- национальный прототип килограмма – копия № 26 Международного прототипа килограмма;
- эталонная гиря R1 массой 1 кг и набор эталонных гирь массой от 1 г до 500 г из платиноиридиевого сплава;
- эталонные весы-компараторы с наибольшими пределами взвешивания (НПВ) 1 кг, 200 г, 25 г и 3 г, имеющие средние квадратические отклонения (СКО) показаний 0,01 мг, 0,005 мг, 0,001 мг и 0,0004 мг.



Рис. 5.8. Государственный первичный эталон единицы массы

Номинальное значение массы, воспроизводимое национальным эталоном единицы массы, 1 кг. Действительное значение массы, полученное по результатам сличений копии № 12 с Международным прототипом килограмма в 1993 г. в МБМВ, составляет $1 \text{ кг} + 0,100 \text{ мг}$. Погрешность результата измерений, полученных при сличении копии № 12 с Международным прототипом килограмма, не превышает $0,0023 \text{ мг}$ (относительная погрешность $2 \cdot 10^{-9}$).

Действительное значение массы копии № 26, полученное при сличении с Международным прототипом килограмма, равно $1 \text{ кг} \pm 0,008 \text{ мг}$.

Государственный первичный эталон единицы массы хранится во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в Санкт-Петербурге. Весь эталонный комплекс находится в специальном термостатированном помещении, находящемся в центре здания, где расположены основные эталоны России. Эталонные весы-компараторы, используемые для сличений эталонов массы, установлены на специальном фундаменте, изолированном от фундамента основного здания. Это существенно уменьшает влияние вибраций на процесс взвешивания при сличениях эталонов массы. Амплитуда вибрации этого фундамента не превышает 5 мкм при частоте колебаний менее 10 Гц.

Температура в эталонном помещении поддерживается в пределах $20 \pm 2^\circ\text{C}$ при относительной влажности воздуха $60 \pm 15\%$. Изменение температуры воздуха в эталонном помещении не превышает $\pm 0,1^\circ\text{C}$ за 1 час, а изменение температуры воздуха внутри витрины эталонных весов-компараторов во время сличения эталонов не превышает $0,01^\circ\text{C}$ за 1 час.

Национальные прототипы килограмма – копии № 12 и № 26 Международного прототипа килограмма хранятся в специальном сейфе, расположенном внутри термостатированного помещения. Копия № 12 установлена на кварцевой пластине и закрыта двумя притертыми стеклянными колпаками. Копия № 26 также закрыта двумя стеклянными колпаками.

Копия № 26 Международного прототипа килограмма заменяет национальный прототип № 12 в период его сличений в Международном бюро мер и весов.

Периодические исследования ГПЭ единицы массы проводятся один раз в 7 лет. При периодических исследованиях ГПЭ производят взаимные сличения национального прототипа килограмма – копии № 12 Международного прототипа килограмма с копией № 26 Международного прототипа килограмма и с эталонной гирей R1 на эталонных весах-компараторе с наибольшим пределом взвешивания 1 кг, входящих в состав ГПЭ единицы массы. Перед проведением сличений производится подготовка к работе эталонных весов, их исследование, определение погрешностей и аттестация.

Государственный первичный эталон единицы массы обеспечивает высокую точность передачи единицы массы эталонам-копиям и рабочим эталонам в соответствии с ГОСТ 8.021-84 «Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений массы».

Подтверждением высокой точности передачи размера единицы массы от национального эталона килограмма – копии № 12 стальным эталонам-копиям являются результаты Третьих международных сличений национальных эталонов единицы массы (1991-1993 гг.) и Международных круговых сличений стальных эталонов массы (1996-1997 гг.).

5.2.3. Поверочные схемы

Обеспечение правильной передачи размера единиц физической величины во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем. Поверочная схема – это нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим СИ с указанием методов и погрешности при передаче. Основные положения о поверочных схемах приведены в ГОСТ 8.061–80. «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение». Поверочные схемы делятся на государственные, ведомственные и локальные.

Государственная поверочная схема распространяется на все средства измерения данной ФВ, имеющиеся в стране. Она разрабатывается в виде государственного стандарта, состоящего из чертежа поверочной схемы и текстовой части, содержащей пояснения к чертежу.

Локальная поверочная схема распространяется на средства измерения данной ФВ, применяемые в регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии. Они не должны противоречить государственным схемам для СИ одних и тех же величин. Они могут быть составлены при отсутствии государственной поверочной схемы. В них допускается указывать конкретные типы (экземпляры) средств измерений. Ведомственная и локальная поверочные схемы оформляют в виде чертежа, элементы которого приведены на рис. 5.9.

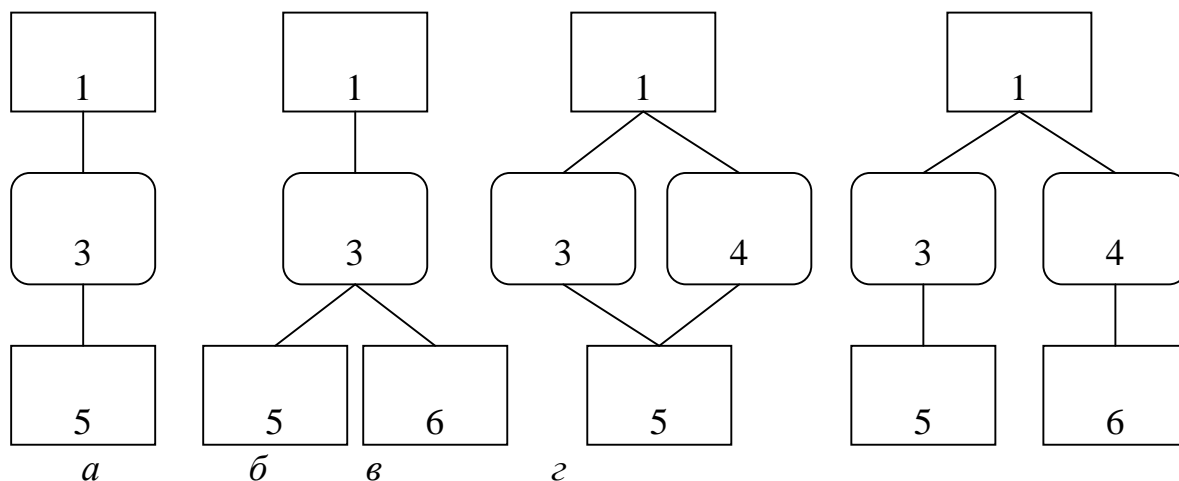


Рис. 5.9. Элементы графического изображения поверочных схем при передаче размера: а – от эталона 1 к объекту 5 методом 3; б – от эталона 1 к объектам поверки 5 и 6 методом 3; в – от эталона 1 к объекту поверки 5 методом 3 или 4; г – от эталона 1 к объекту поверки 5 методом 3 и объекту поверки 6 методом 4.

Поверочная схема устанавливает передачу размера единиц одной или нескольких взаимосвязанных величин. Она должна включать не менее двух ступеней передачи размера. Поверочную схему для средств

измерения одной и той же величины, существенно отличающихся по диапазонам измерений, условиям применения и методам поверки, а также для средств измерений нескольких ФВ допускается подразделять на части.

На чертежах поверочной схемы должны быть указаны:

- наименования СИ и методов поверки;
- номинальные значения ФВ или их диапазоны;
- допускаемые значения погрешностей СИ;
- допускаемые значения погрешностей методов поверки.

Правила расчета параметров поверочных схем и оформления чертежей этих схем приведены в ГОСТ 8.061–80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение» и в рекомендациях МИ 83–76 «Методика определения параметров поверочных схем». В поверочных схемах приводятся различные способы поверки средств измерений.

5.3. Основы техники измерений

5.3.1. Виды измерений

Вид измерений – часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин. Виды измерений определяются физическим характером измеряемой величины, требуемой точностью измерения, необходимой скоростью измерения, условиями и режимом измерений и т. д. В метрологии существует множество видов измерений, и число их постоянно увеличивается (рис. 5.10).

Можно, например, выделить виды измерений в зависимости от:

- *цели измерений*: контрольные, диагностические и прогностические, лабораторные и технические, эталонные и поверочные, абсолютные и относительные и т. д.;
- *метода измерений*: непосредственной оценки, сравнения с мерой, противопоставления, дифференциальный, нулевой, замещения (совпадений);
- *условий измерений*: равноточные, неравноточные;
- *характера результата измерений*: абсолютные, допусковые (пороговые), относительные;
- *числа измерений величины*: однократные, многократные;
- *связи с объектом*: бесконтактные, контактные;
- *степени достаточности измерений*: необходимые, избыточные.

Наиболее часто используют классификацию видов измерений *по способу получения числового значения измеряемой величины*. В этом случае все измерения делят на четыре основных вида:

- прямые измерения;
- косвенные измерения;
- совокупные измерения;
- совместные измерения.



Рис. 5.10. Классификация видов измерений

Прямыми называют измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Простейшие примеры прямых измерений: измерение длины линейкой, температуры – термометром, электрического напряжения – вольтметром и пр. Уравнение прямого измерения: $y = C x$, где C – цена деления СИ. Прямые измерения – основа более сложных видов измерений.

Косвенными называют измерения, результат которых определяют на основе прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью $y = f_1(x_1, x_2, \mathbf{K}, x_n)$, где $x_1, x_2, \mathbf{K}, x_n$ – результаты прямых измерений, y – измеряемая величина.

Примеры: объем прямоугольного параллелепипеда определяется по результатам прямых измерений длины в трех взаимно перпендикулярных направлениях; электрическое сопротивление – по результатам измерений падения напряжения и силы тока и т.д.

Находить значения некоторых величин легче и проще путем косвенных измерений, чем путем прямых. Иногда прямые измерения невозможно осуществить. Нельзя, например, измерить плотность твердого тела, определяемую обычно по результатам измерений объема и массы. Косвенные измерения некоторых величин позволяют получить значительно более точные результаты, чем прямые.

Абсолютное измерение – это косвенное измерение, для осуществления которого используется прямое измерение массы, длины и времени.

Совокупными называют измерения, в которых значения измеряемых величин находят по данным повторных измерений одной или нескольких одноименных величин при различных сочетаниях мер или этих величин. Результаты совокупных измерений находят путем решения системы уравнений, составляемых по результатам нескольких прямых измерений. При определении взаимной индуктивности катушки M , например, используют два метода: сложения и вычитания полей. Если индуктивность одной из них L_1 , а другой – L_2 , то находят $L_{01} = L_1 + L_2 + 2M$ и $L_{02} = L_1 + L_2 - 2M$, отсюда $M = (L_{01} - L_{02})/4$.

Совместными называют производимые одновременно (прямые или косвенные) измерения двух или нескольких не одноименных величин. Целью совместных измерений по существу является нахождение функциональной зависимости одной величины от другой, например, зависимости длины тела от температуры, зависимости электрического сопротивления проводника от давления и т.п. Например, измерение сопротивления R_t проводника при фиксированной температуре t по формуле

$$R_t = R_0(1 + a\Delta t),$$

где R_0 и a – сопротивление при известной температуре t_0 (обычно 20°C) и температурный коэффициент – величины постоянные, измеренные

косвенным методом; $\Delta t = t - t_0$ – разность температур; t – заданное значение температуры, измеренное прямым методом.

Основные уравнения связи при совокупном и совместном измерениях имеют вид:

$$f_1(y_1, \dots, y_n, x_1^{(1)}, \dots, x_m^{(1)}) = 0$$

.....

$$f_n(y_1, \dots, y_n, x_1^{(n)}, \dots, x_m^{(n)}) = 0,$$

где y_1, \dots, y_n – искомые величины; x_1, \dots, x_m – параметры или величины, установленные на основе прямого либо косвенного измерения; f_1, \dots, f_n – известные функции связи.

Пусть, например, известна функциональная связь вида $R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$, т.е. связь между сопротивлением R_t при любой температуре t и сопротивлением R_0 при $t=0$ и постоянными коэффициентами α и β . Необходимо определить значения R_0 , α , β .

Для решения этой задачи используется совместный вид измерения. При трех известных значениях температур t_1, t_2, t_3 измеряются прямым способом $R_{t_1}, R_{t_2}, R_{t_3}$, затем составляется система уравнений, решение которой позволяет определить искомые величины

$$R_0(1 + \alpha t_1 + \beta t_1^2) = R_{t_1}$$

$$R_0(1 + \alpha t_2 + \beta t_2^2) = R_{t_2}$$

$$R_0(1 + \alpha t_3 + \beta t_3^2) = R_{t_3}$$

Эти уравнения называются условными. Они представляют зависимость R от t при фиксированных значениях t . Иначе говоря, совместные измерения позволяют получить систему уравнений, связывающих зависимые величины между собой при различных их значениях.

Таким образом, любой процесс измерения представляет собой тот или иной прием сравнения измеряемой величины с величиной воспроизводимой мерой при использовании различных средств измерений.

5.3.2. Методы измерений

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

Принцип измерений – физическое явление или эффект, положенное в основу измерений (например, использование силы тяжести при измерении массы взвешиванием, или применение эффекта Доплера для измерения скорости).

Прямые измерения – основа более сложных измерений, и поэтому целесообразно рассмотреть методы прямых измерений. В соответствии с [24] различают:

1. Метод непосредственной оценки – метод, при котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора, например измерение давления пружинным манометром, массы – на весах, силы электрического тока – амперметром.

2. Метод сравнения с мерой (метод сравнения) – метод, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Пример:

- измерение массы на рычажных весах с уравниванием гирями (мерами массы с известными значениями);
- измерение напряжения постоянного тока на компенсаторе сравнением с известной ЭДС нормального элемента.

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

4. Дифференциальный 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.

Пример:

Измерить длину x стержня, если известна длина l ($l < x$) меры. Как показано на рис. 5.11, $x = l + a$ (a – измеряемая величина).

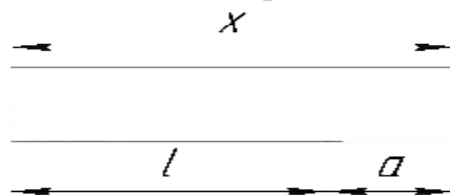


Рис. 5.11. Дифференциальный метод измерения

Действительные значения a_D будут отличаться от измеренного a на величину погрешности Δ : $a_D = a \pm \Delta = a(1 \pm \Delta/a)$.

Тогда $x = l + a \pm \Delta = (l + a)[1 \pm \Delta/(l + a)]$.

Поскольку $l \gg a$, то $\Delta/(l + a) \ll \Delta/a$.

Пусть $\Delta = 0,1$ мм; $l = 1000$ мм; $a = 10$ мм,

тогда $0,1/1010 = 0,0001 (0,01\%) \ll 0,1/10 = 0,01 (1\%)$.

5. Нулевой метод – метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на прибор сравнения доводят до нуля.

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.

Пример:

Измерения электрического сопротивления мостом с полным его уравниванием. Рассмотрим, например, неравноплечие весы (рис. 5.12(а)), где $P_1 l_1 = P_2 l_2$. В электротехнике – это мосты для измерения индуктивности, емкости, сопротивления (рис. 5.12(б)). Здесь $r_1 r_2 = r_x r_3$, откуда $r_x = r_1 r_2 / r_3$. В общем случае совпадение сравниваемых величин регистрируется нуль-индикатором (И).

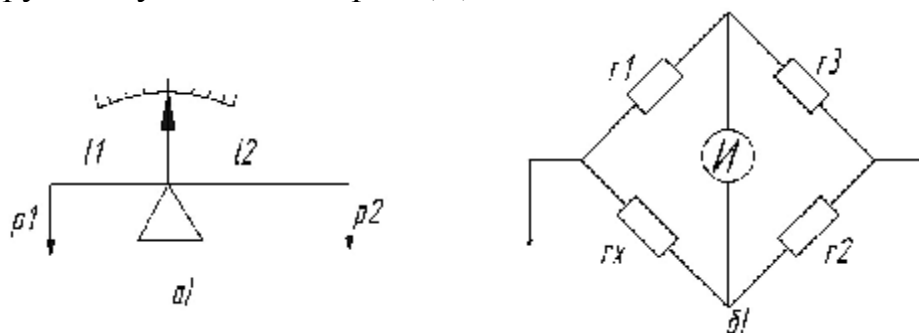


Рис. 5.12. Нулевой метод измерения:

а – схема механических весов, б – схема электрического моста

6. Метод замещения – метод сравнения с мерой, в которой измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины.

Пример:

Взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов (метод Борда).

Кроме того, можно выделить нестандартизованные методы:

- метод **противопоставления**, при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения.

Пример:

Измерения массы на равноплечих весах с помещением измеряемой массы и уравнивающих ее гирь на двух чашках весов.

- метод **совпадений** представляет собой разновидность метода сравнения с мерой, при котором разность между сравниваемыми величинами измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

Пример:

- При измерении длины штангенциркулем наблюдают совпадение отметок на шкалах штангенциркуля и нониуса. Шкала нониуса штангенциркуля имеет десять делений через 0,9 мм. Когда нулевая отметка шкалы нониуса оказывается между отметками основной шкалы штангенциркуля, это означает, что к целому числу миллиметров необходимо добавить число десятых долей миллиметра, равное порядковому номеру совпадающей отметки нониуса.
- При измерении частоты вращения стробоскопом – метки на вращающемся объекте совпадают с моментами вспышек известной частоты.

5.4. Контрольные вопросы

1. Определите суть понятия «единство измерений».
2. Какие задачи метрологии охватывает понятие «единство измерений»?
3. Какими документами регламентируется деятельность по обеспечению единства измерений?
4. Каким образом достигается тождественность единиц, в которых проградуированы все существующие СИ одной и той же величины?
5. Каким образом осуществляется воспроизведение основной единицы?
6. Что является технической основой обеспечения единства измерений?
7. Совпадает ли перечень существующих эталонов и перечень принятых ФВ?
8. Какими признаками должен обладать эталон? Поясните суть этих признаков.
9. Перечислите основные виды эталонов. В чем состоит их различие?
10. Какие эталоны являются высшим звеном эталонной базы страны?
11. Опишите современный эталон единицы длины – метр.
12. Что представляет собой эталон единицы массы – килограмм?
13. Приведите определение секунды.
14. Назовите основные виды измерений.
15. Всегда ли можно провести прямые измерения?
16. Приведите примеры прямых, косвенных, совокупных и совместных измерений.
17. Что является целью совместных измерений?
18. Перечислите основные методы измерений.
19. Объясните, чем нулевой метод измерения отличается от дифференциального метода. В чем заключается преимущество нулевого метода перед дифференциальным методом?
20. Укажите, какой метод измерения позволяет получить результат высокой точности при использовании относительно грубых средств измерения.

РАЗДЕЛ 6. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Понятие о средстве измерений

Средство измерений – это техническое средство (или комплекс), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящие и (или) хранящие единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени [24]. Данное определение раскрывает метрологическую сущность СИ, заключающуюся в умении хранить (или воспроизводить) единицу ФВ и в неизменности размера хранимой единицы во времени. Первое обуславливает возможность выполнения измерения, суть которого, как известно, состоит в сравнении измеряемой величины с ее единицей. Второе принципиально необходимо, поскольку при изменении размера хранимой единицы ФВ с помощью данного СИ нельзя получить результат с требуемой точностью.

Средство измерения является обобщенным понятием, объединяющим разнообразные конструктивно законченные устройства, которые реализуют одну из двух функций:

- воспроизводят величину заданного (известного) размера, например, гиря – заданную массу, магазин сопротивлений – ряд дискретных значений сопротивления;
- вырабатывают сигнал (показание), несущий информацию о значении измеряемой величины. Показания СИ либо непосредственно воспринимаются органами чувств человека (например, показания стрелочного или цифрового приборов), либо они недоступны восприятию человеком и используются для преобразования другими СИ.

Последняя функция, являющаяся основной, может быть реализована только посредством измерения. Очевидно, что СИ должны содержать устройства (блоки, модули), которые выполняют эти элементарные операции. Такие устройства называются *элементарными* средствами измерений. В их число входят измерительные преобразователи, меры и устройства сравнения (компараторы) [25].

Измерительный преобразователь – это техническое средство с нормированными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины X в другую величину или измерительный сигнал X_1 , удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи [24]. *Информативным параметром входного сигнала* СИ является параметр входного сигнала, функционально связанный с измеряемой величиной и используемый для передачи ее значения или являющийся самой измеряемой величиной.

Мера – это средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного (однозначная мера) или нескольких (многозначная мера) размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

Устройство сравнения – это техническое средство, дающее возможность выполнять сравнение выходных сигналов мер однородных величин или же показаний измерительных приборов [24].

Обобщенная структурная схема СИ показана на рис. 6.1 [27]. Входным сигналом является измерительный сигнал, один из параметров которого однозначно связан с измеряемой ФВ:

$$X = X \{ a_0[\Psi(t)], a_1, a_2, \mathbf{K}, a_n \}, \quad (6.1)$$

где a_0 – информативный параметр входного сигнала; $\Psi(t)$ – измеряемая ФВ; $a_1, a_2, \mathbf{K}, a_n$ – неинформативные параметры входного сигнала. *Неинформативным параметром входного сигнала СИ* называется параметр, не используемый для передачи значения измеряемой величины.

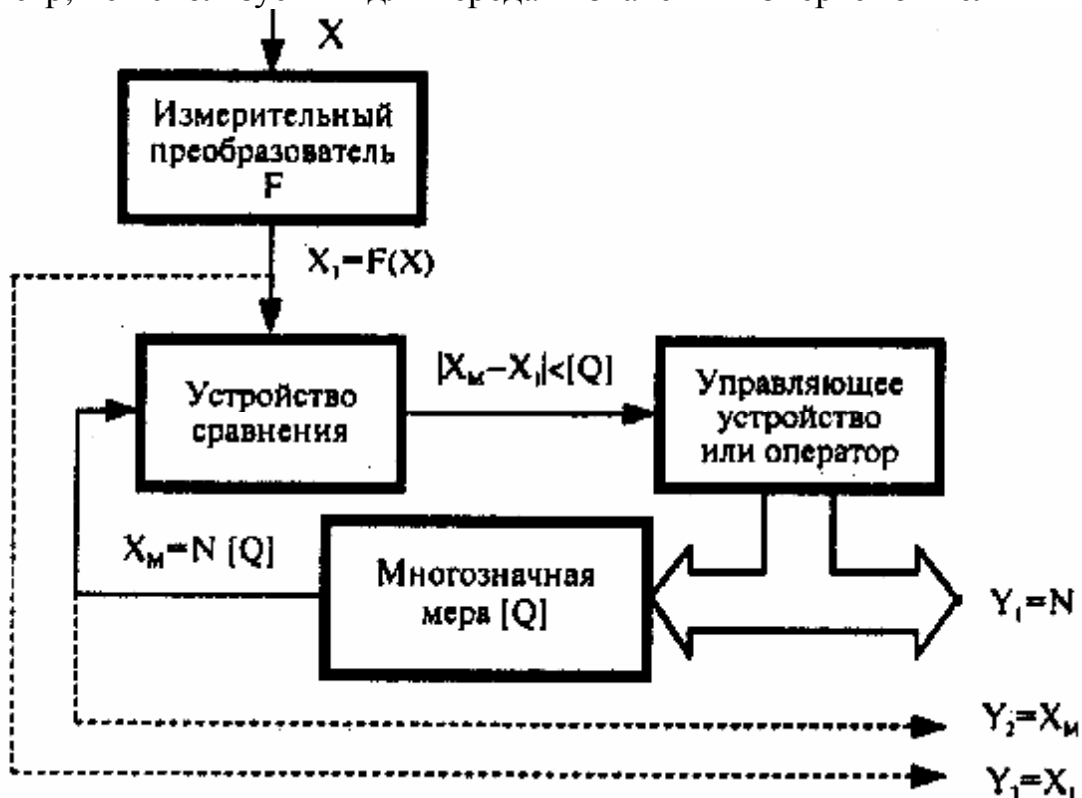


Рис. 6.1. Обобщенная структурная схема средства измерения

Входным сигналом X является измерительный сигнал, один из параметров которого однозначно связан с измеряемой ФВ. Входной сигнал преобразуется измерительным преобразователем в пропорциональный ему сигнал X_1 . Следует отметить, что преобразователь может отсутствовать, тогда входной сигнал будет подаваться непосредственно на один из входов устройства сравнения.

Сигнал со входа измерительного преобразователя поступает на первый вход устройства сравнения, на второй вход которого подается известный сигнал с выхода многозначной меры. Роль меры могут выполнять самые разные устройства. Например, при взвешивании на весах мерой являются гири с известным весом. Во многих простых СИ роль меры выполняют отсчетные шкалы, предварительно проградуированные в единицах измеряемой величины. К таким средствам измерений относятся линейка, термометр, электромеханические вольтметры и др. Значение выходной величины многозначной меры изменяется в зависимости от величины цифрового кода N , который условно считается ее входным сигналом. Изменение кода осуществляется оператором (например, при взвешивании на весах) или автоматически. Так как цифровой код – величина дискретная, то и выходной сигнал меры изменяется ступенями – квантами, кратными единице сравниваемых величин.

Сравнение измеряемой и известной величин осуществляется при помощи устройства сравнения. Роль последнего в простейших СИ, имеющих отсчётные шкалы, выполняет человек. Например, при измерении длины тела он сопоставляет её с многозначной мерой – линейкой и находит количество N квантов меры, равное с точностью до кванта измеряемой длине. Устройство сравнения дает информацию, о том, какое значение выходного сигнала многозначной меры должно быть установлено автоматически или при участии оператора. Процесс измерения прекращается при достижении равенства между величинами X_1 и X_M с точностью до кванта $[Q]$.

Выходным сигналом может служить один из трех сигналов: Y_1, Y_2, Y_3 . Если выходной сигнал предназначен для непосредственного восприятия человеком, то его роль выполняет сигнал $Y_1 = N$. В данном случае код N является привычным для человека десятичным кодом. Если же выходной сигнал СИ предназначен для применения в других средствах измерения, то в качестве него может быть использован любой из трех сигналов: Y_1, Y_2, Y_3 . Первый из них при этом является цифровым, как правило, двоичным кодом, который «понимают» входные цифровые устройства последующих СИ. Аналоговый сигнал Y_2 квантован по уровню и представляет собой эквивалент цифрового кода N , а СИ в этом случае предназначено для воспроизведения ФВ заданного размера и состоит только из одного блока – многозначной меры. Сигнал Y_3 представляет собой измерительное преобразование входного сигнала X , СИ при этом используется только как измерительный преобразователь, а остальные его блоки отсутствуют.

Таким образом, структурная схема, показанная на рис. 6.1, описывает три возможных варианта:

- СИ включает все блоки и вырабатывает сигнал Y_1 , доступный восприятию органами чувств человека. Возможно формирование выходных сигналов Y_2 и Y_3 , предназначенных только для преобразования другими СИ;
- СИ состоит только из измерительного преобразователя, выходной сигнал которого равен Y_3 ;
- СИ содержит только меру, выходной сигнал которой равен Y_2 .

В общем случае выходной сигнал $Y(X)$ описывается выражением $Y = Y\{b_0[X], b_1, b_2, \mathbf{K}, b_m, S_1, S_2, \mathbf{K}, S_l, \xi_1, \xi_2, \mathbf{K}, \xi_k\}$, где $b_0[X]$ – *информативный параметр выходного сигнала*, функционально связанный с информативным параметром входного сигнала (6.1); $b_1, b_2, \mathbf{K}, b_m$ – неинформативные параметры выходного сигнала; $S_1, S_2, \mathbf{K}, S_l$ – параметры СИ, зависящие от его методической и аппаратной реализации; $\xi_1, \xi_2, \mathbf{K}, \xi_k$ – влияющие величины. *Неинформативным параметром выходного сигнала СИ* называется параметр, не используемый для передачи или индикации значения информативного параметра входного сигнала.

СИ могут работать в двух режимах: статическом и динамическом. *Статический режим* – это такой режим работы СИ, при котором изменением измеряемой величины за время, требуемое для проведения одного измерения, можно пренебречь. В *динамическом режиме* такое пренебрежение недопустимо, поскольку указанное изменение превышает допустимую погрешность.

6.2. Классификация средств измерений

Средства измерения, используемые в различных областях науки и техники, чрезвычайно многообразны. Однако для этого множества можно выделить некоторые общие признаки, присущие всем СИ независимо от области применения. Эти признаки положены в основу различных классификаций СИ, которые рассмотрены далее [23].

По *роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений*, СИ делятся на:

- *метрологические*, предназначенные для метрологических целей – воспроизведения единицы и (или) хранения или передачи размера единицы;
- *рабочие*, применяемые для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

По *уровню автоматизации* все СИ делятся на три группы:

- *неавтоматические*;
- *автоматизированные*, производящие в автоматическом режиме одну или часть измерительной операции;

- *автоматические*, производящие без непосредственного участия человека измерения и все операции, связанные с обработкой их результатов (регистрацией), передачей данных или выработкой управляющих сигналов.

По *уровню стандартизации* средства измерений подразделяются на:

- *стандартизованные*, изготовленные в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта;
- *нестандартизованные* (уникальные), предназначенные для решения специальной измерительной задачи, в стандартизации требований к которым нет необходимости.

По *отношению к измеряемой физической величине* средства измерения делятся на:

- *основные* – это СИ той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей;
- *вспомогательные* – это СИ той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерения необходимо учесть для получения результатов измерения требуемой точности.

Классификация *по роли в процессе измерения и выполняемым функциям* является основной и представлена на рис. 6.2 [27].

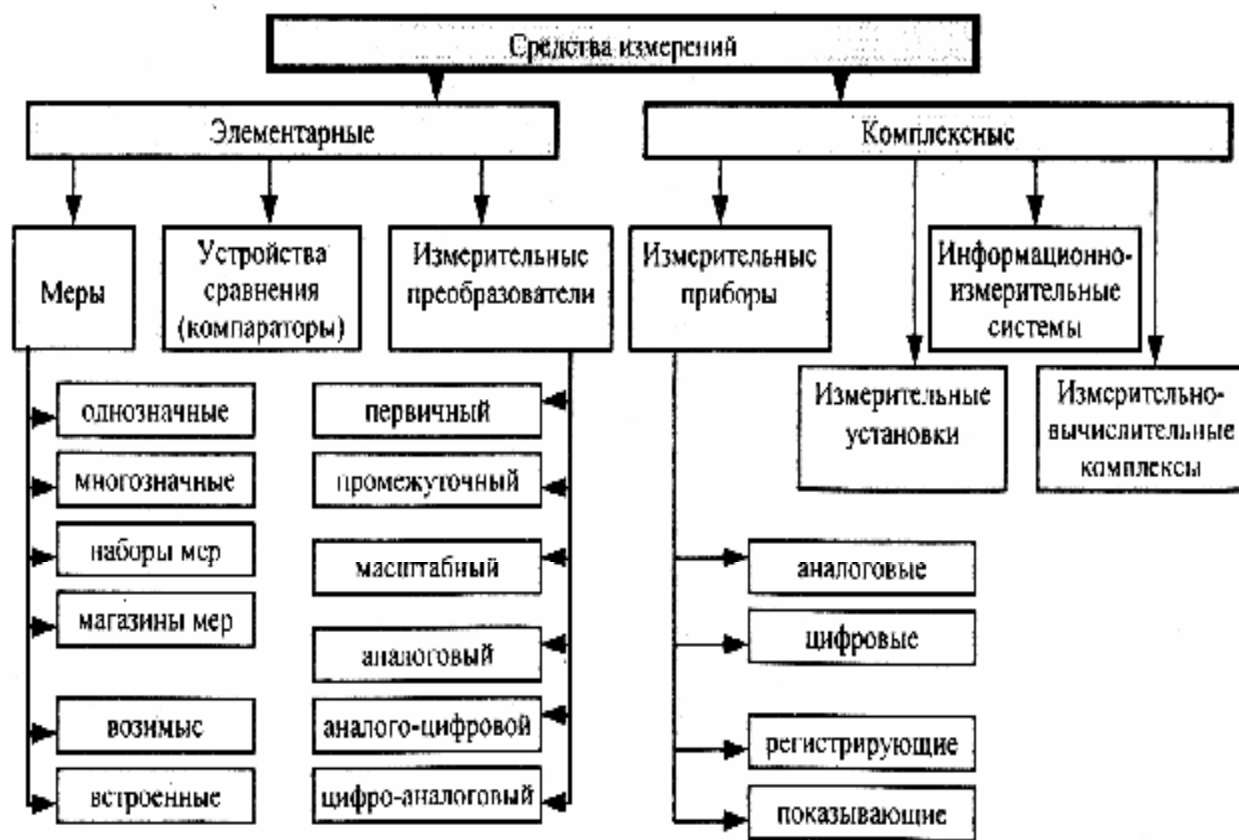


Рис. 6.2. Классификация средств измерений по их роли в процессе измерения и выполняемым функциям

6.3. Метрологические характеристики средств измерений и их нормирование

При использовании средств измерений принципиально важно знать степень соответствия информации об измеряемой величине, содержащейся в выходном сигнале, ее истинному значению. С этой целью для каждого СИ вводятся и нормируются определенные метрологические характеристики (МХ). *Метрологическими* называются характеристики свойств СИ, оказывающие влияние на результат измерения и его погрешности. Характеристики, устанавливаемые нормативными документами, называются *нормируемыми*, а определяемые экспериментально – *действительными*. Номенклатура МХ, правила выбора комплексов нормируемых МХ для средств измерений и способы их нормирования определяются стандартом ГОСТ 8.009–84. Подробные комментарии к этому документу приведены в [19].

Метрологические характеристики СИ позволяют:

- определять результаты измерений и рассчитывать оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерения в реальных условиях применения СИ;
- рассчитывать МХ каналов измерительных систем, состоящих из ряда средств измерений с известными МХ;
- производить оптимальный выбор СИ, обеспечивающих требуемое качество измерений при известных условиях их применения;
- сравнивать СИ различных типов с учетом условий применения.

При разработке принципов выбора и нормирования средств измерений необходимо придерживаться следующих положений [21, 23, 30]:

1. Основным условием возможности решения всех перечисленных задач является наличие однозначной связи между нормированными МХ и инструментальными погрешностями. Эта связь устанавливается посредством математической модели инструментальной составляющей погрешности, в которой нормируемые МХ должны быть аргументами.

2. Нормирование МХ средств измерений должно производиться исходя из единых теоретических предпосылок. Это связано с тем, что в измерительных процессах могут участвовать СИ, построенные на различных принципах.

3. Нормируемые МХ должны быть выражены в такой форме, чтобы с их помощью можно было обоснованно решать практически любые измерительные задачи и одновременно достаточно просто проводить контроль СИ на соответствие этим характеристикам.

4. Нормируемые МХ должны обеспечивать возможность статистического объединения, суммирования составляющих инструментальной погрешности измерений. В общем случае она может

быть определена как сумма (объединение) следующих составляющих погрешности:

- $\Delta_0(t)$, обусловленной отличием действительной функции преобразования в нормальных условиях от номинальной, приписанной соответствующими документами данному типу СИ. Эта погрешность называется *основной*;
- Δ_{cj} , обусловленной реакцией СИ на изменение внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала относительно их номинальных значений. Эта погрешность называется *дополнительной*;
- Δ_{din} , обусловленной реакцией СИ на скорость (частоту) изменения входного сигнала. Эта составляющая, называемая *динамической погрешностью*, зависит и от динамических свойств СИ, и от частотного спектра входного сигнала;
- Δ_{int} , обусловленной взаимодействием СИ с объектом измерений или с другими СИ, включенными в измерительную систему.

Первые две составляющие представляют собой статическую погрешность СИ, а третья – динамическую. Из них только основная погрешность определяется свойствами СИ. Дополнительная и динамическая погрешности зависят как от свойств самого СИ, так и от некоторых других причин (внешних условий, параметров измерительного сигнала и др.).

5. Нормируемые МХ должны быть инвариантны к условиям применения и режиму работы СИ и отражать только его свойства.

6. Нормируемые МХ, приводимые в нормативной документации, отражают свойства не отдельно взятого экземпляра СИ, а всей совокупности СИ этого типа, т.е. являются номинальными.

Перечень нормируемых МХ делится на шесть основных групп, которые приведены на рис. 6.3.

Для определения результатов измерений должны быть известны следующие МХ:

- **Функция преобразования $F(X)$** . Данная функция нормируется для измерительных преобразователей и приборов с неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц входной величины. Задается в виде формулы, таблицы или графика и используется для определения значений измеряемой величины X в рабочих условиях применения СИ по известному значению информативного параметра его выходного сигнала.
- **Значение одно- (Y) или многозначной (Y_i) меры**. Для этих характеристик нормируются номинальные или индивидуальные

значения. Они используются для устройств, применяемых в качестве мер.

- **Цена деления шкалы измерительного прибора или многозначной меры.** Нормирование цены деления производится для показывающих приборов с равномерной шкалой, функция преобразования которых отображается на именованной шкале. При неравномерной шкале нормируется минимальная цена деления.
- **Характеристики цифрового кода, используемого в СИ и их элементах.** К ним относятся: вид выходного кода, число его разрядов, цена единицы младшего разряда. Эти характеристики нормируются для цифровых приборов.



Рис. 6.3. Номенклатура метрологических характеристик средств измерений

Метрологические характеристики погрешностей СИ, приведенные на рис. 6.3 [27], описывают погрешности, обусловленные собственными свойствами СИ в нормальных условиях эксплуатации. Суммарное значение этих погрешностей образует основную погрешность СИ.

6.4. Классы точности средств измерений

Характеристики, введенные ГОСТ 8.009–84, наиболее полно описывают метрологические свойства СИ. Однако в настоящее время в эксплуатации находится достаточно большое число СИ, метрологические характеристики которых нормированы несколько по-другому, а именно на

основе классов точности [1, 7, 9, 10, 14, 23, 27, 29, 33]. Класс точности – это обобщенная характеристика СИ, выражаемая пределами допускаемых значений его основной и дополнительной погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Класс точности не является непосредственной оценкой точности измерений, выполняемых этим СИ, поскольку погрешность зависит еще от ряда факторов: метода измерений, условий измерений и т.д. Класс точности лишь позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность СИ данного типа. Общие положения деления средств измерений по классу точности устанавливает ГОСТ 8.401–80.

Пределы допускаемой основной погрешности $\Delta_{СИ}$, определяемые классом точности, – это интервал, в котором находится значение основной погрешности СИ.

Классы точности СИ устанавливаются в стандартах или технических условиях. Средство измерения может иметь два и более класса точности. Например, при наличии у него двух или более диапазонов измерений одной и той же физической величины ему можно присваивать два или более класса точности. Приборы, предназначенные для измерения нескольких физических величин, также могут иметь различные классы точности для каждой измеряемой величины.

Пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей выражают в форме приведенных, относительных или абсолютных погрешностей. Выбор формы представления зависит от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения СИ.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливаются по одной из формул: $\Delta = \pm a$ или $\Delta = \pm(a + bx)$, где x – значение измеряемой величины или число делений, отсчитанное по шкале; a, b – положительные числа, не зависящие от x .

Первая формула описывает чисто аддитивную погрешность (рис. 6.4, а), а вторая – сумму аддитивной и мультипликативной (рис. 6.4, б) погрешностей (рис. 6.4, в). В технической документации классы точности, установленные в виде абсолютных погрешностей, обозначают, например, «Класс точности М», а на приборе – буквой «М». Для обозначения используются прописные буквы латинского алфавита или римские цифры, причём меньшие пределы погрешностей должны соответствовать буквам, находящимся ближе к началу алфавита, или меньшим цифрам.

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности определяются по формуле $\gamma = \Delta/x_N = \pm p$, где x_N – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ ; p – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда значений:

(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) · 10ⁿ; $n = 1; 0; -1; -2; \mathbf{K}$.

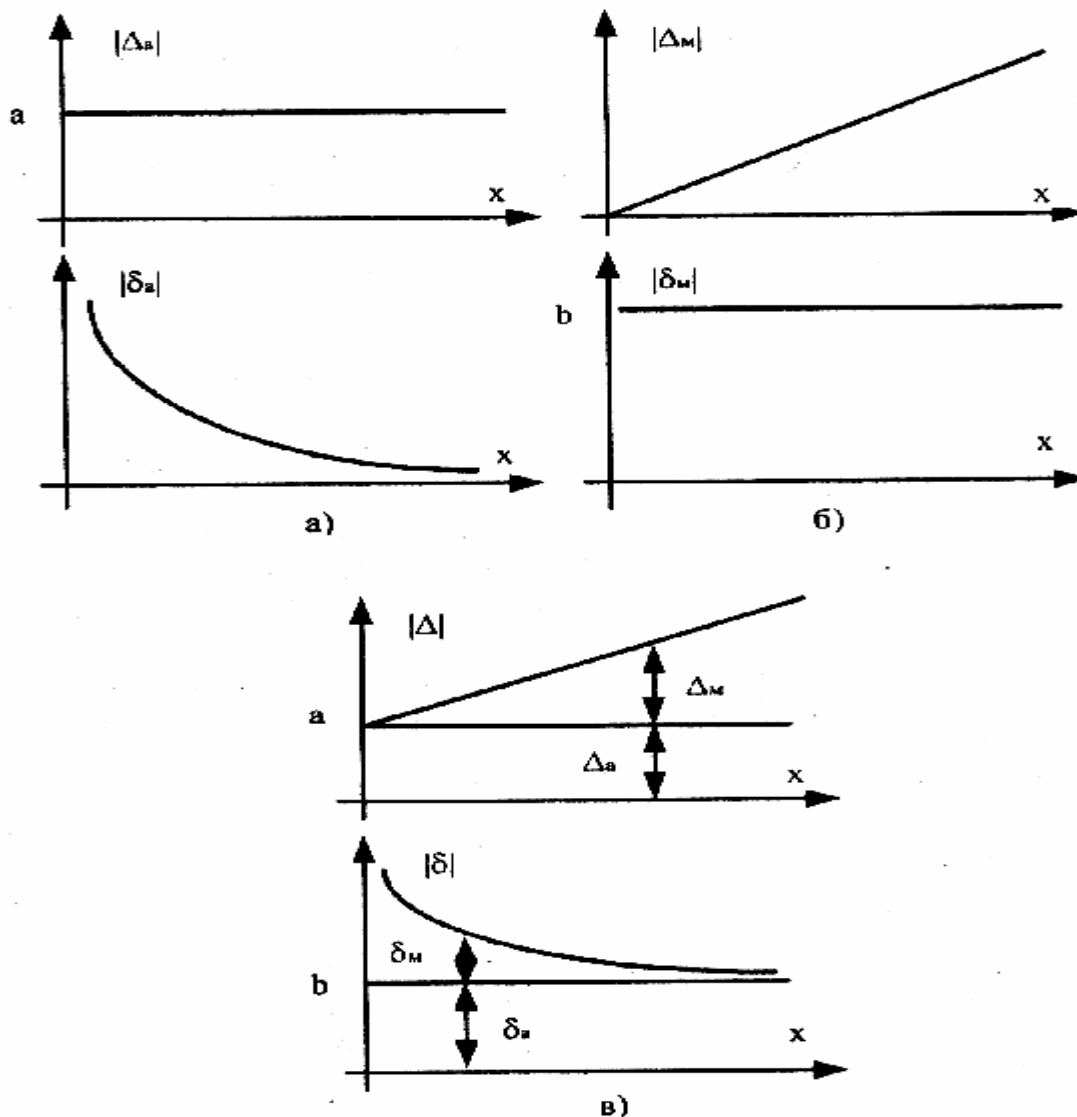


Рис. 6.4. Аддитивная а), мультипликативная б) и суммарная в) погрешности в абсолютной и относительной формах

Нормирующее значение x_N устанавливается равным большему из пределов измерений (или модулей) для СИ с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой и для измерительных преобразователей, для которых нулевое значение выходного сигнала находится на краю или вне диапазона измерений. Для СИ, шкала которых имеет условный нуль, x_N равно модулю разности пределов измерений.

Для приборов с существенно неравномерной шкалой x_N принимают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерения. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины, а на средстве измерений класс точности условно обозначают, например, в виде значка $0,5$, где $0,5$ – значение числа p (рис. 6.5).

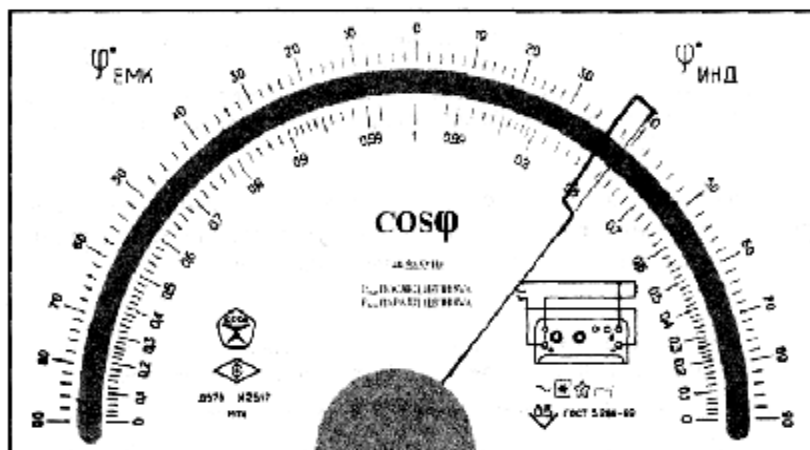


Рис. 6.5. Лицевая панель фазометра класса точности 0,5 с существенно неравномерной нижней шкалой

В остальных рассмотренных случаях класс точности обозначают конкретным числом p , например 1,5. Обозначение наносится на циферблат, щиток или корпус прибора (рис. 6.6).

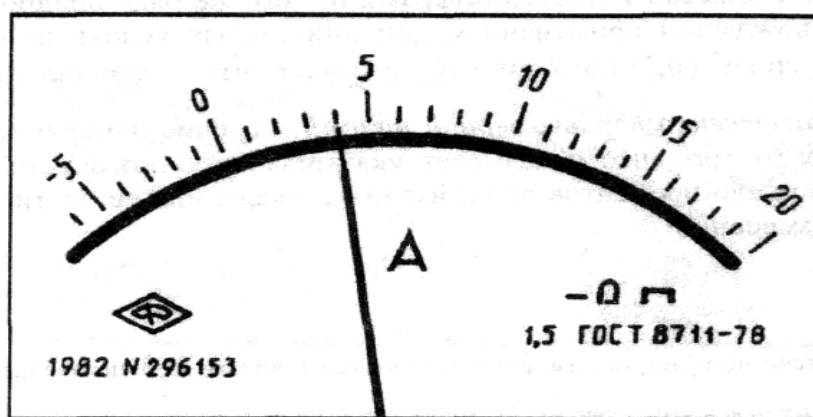


Рис. 6.6. Лицевая панель амперметра класса точности 1,5 с равномерной шкалой

В случае если абсолютная погрешность задается формулой $\pm(a + bx)$, пределы допускаемой относительной основной погрешности

$$\delta = \Delta/x = \pm[c + d(|x_k/x| - 1)], \quad (6.2)$$

где c, d – отвлеченные положительные числа, выбираемые из ряда:

(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) · 10 ^{n} ; $n = 1; 0; -1; -2$; K ; x_k – больший (по модулю) из пределов измерений. При использовании формулы (6.2) класс точности обозначается в виде «0,02/0,01», где числитель – конкретное значение числа c , знаменатель – числа d (рис. 6.7). В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной основной погрешности определяют по более сложным формулам либо в виде графика или таблицы.

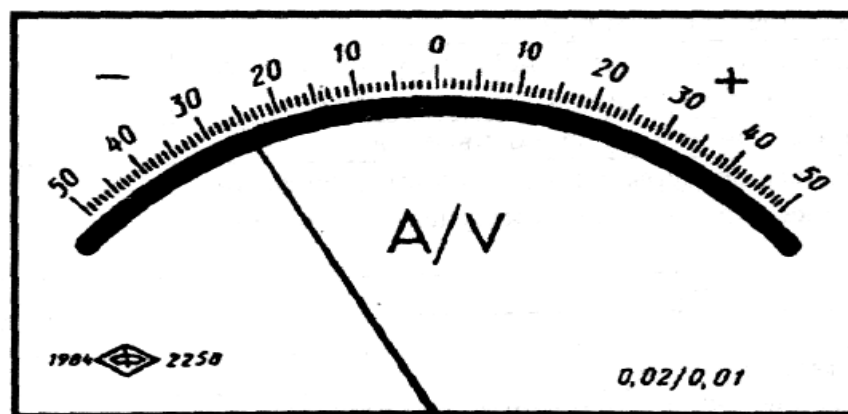


Рис. 6.7. Лицевая панель ампервольтметра класса точности 0,02/0,01 с равномерной шкалой

Пределы допускаемой относительной основной погрешности определяются по формуле $\delta = \Delta/x = \pm q$, если $\Delta = \pm a$. Значение постоянного числа q устанавливается так же, как и значение числа p . Класс точности на прибор обозначается в виде $\textcircled{0,5}$, где 0,5 – конкретное значение q (рис. 6.8).

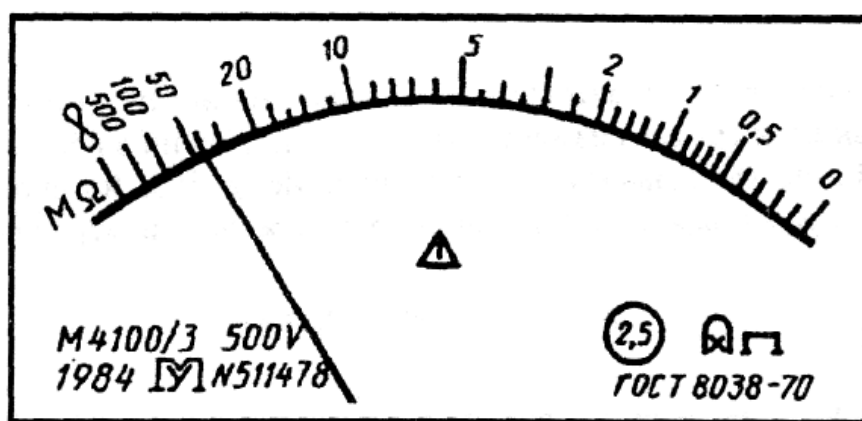


Рис 6.8. Лицевая панель мегаомметра класса точности 2,5 с неравномерной шкалой

В стандартах и технических условиях на СИ указывается минимальное значение x_0 , начиная с которого применим принятый способ выражения пределов допускаемой относительной погрешности. Отношение x_k/x_0 называется динамическим диапазоном измерения.

Правила построения и примеры обозначения классов точности в документации и на средствах измерений приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1.

Обозначение классов точности средств измерений

Формула для определения пределов допускаемой погрешности	Примеры пределов допускаемой основной погрешности	Обозначение класса точности	
		В документах	На средствах
Абсолютная погрешность			
$\Delta = \pm a$	$\Delta = \pm 2 \Gamma_{\text{ц}}$	Класс точности М	М
$\Delta = \pm(a + bx)$	$\Delta = \pm(2 + 0,03 f) \Gamma_{\text{ц}}$	Класс точности С	С
Приведенная погрешность			
$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} = \pm p$	$\gamma = \pm 1,5\%$	Класс точности 1,5	1,5
	$\gamma = \pm 0,5\%$	Класс точности 0,5	0,5 ✓ (для СИ с неравномерной шкалой)
Относительная погрешность			
$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm q$	$\delta = \pm 0,5\%$	Класс точности 0,5	0,5
$\delta = \Delta/x = \pm [c + d(x_k/x - 1)]$	$\delta = \pm [0,02 + 0,01(x_k/x - 1)]\%$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01

6.5. Надежность средств измерений

6.5.1. Основные понятия теории метрологической надежности

В процессе эксплуатации метрологические характеристики и параметры средства измерений претерпевают изменения. Эти изменения носят случайный монотонный или флуктуирующий характер и приводят к отказам, т.е. к невозможности СИ выполнять свои функции. Отказы делятся на неметрологические и метрологические.

Неметрологическим называется отказ, обусловленный причинами, не связанными с изменением МХ средства измерений. Они носят, главным образом, явный характер, проявляются внезапно и могут быть обнаружены без проведения поверки.

Метрологическим называется отказ, вызванный выходом МХ из установленных допустимых границ. Как правило, метрологические отказы происходят значительно чаще, чем неметрологические. Это обуславливает

необходимость разработки специальных методов их прогнозирования и обнаружения [17]. Метрологические отказы подразделяются на внезапные и постепенные.

Внезапным называется отказ, характеризующийся скачкообразным изменением одной или нескольких МХ. Эти отказы в силу их случайности невозможно прогнозировать. Их последствия (сбой показаний, потеря чувствительности и т.п.) легко обнаруживаются в ходе эксплуатации прибора, т.е. по характеру проявления они являются явными. Особенность внезапных отказов – постоянство во времени их интенсивности. Это дает возможность применять для анализа данных отказов классическую теорию надежности.

Постепенным называется отказ, характеризующийся монотонным изменением одной или нескольких МХ. По характеру проявления постепенные отказы являются скрытыми и могут быть выявлены только по результатам периодического контроля СИ.

С понятием «метрологический отказ» тесно связано понятие *метрологической исправности* средства измерений. Под ней понимается состояние СИ, при котором все нормируемые МХ соответствуют установленным требованиям. Способность СИ сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации называется *метрологической надежностью*. Специфика проблемы метрологической надежности состоит в том, что для нее основное положение классической теории надежности о постоянстве во времени интенсивности отказов оказывается неправомерным.

Современная теория надежности ориентирована на изделия, обладающие двумя характерными состояниями: работоспособным и неработоспособным [27]. Постепенное изменение погрешности СИ позволяет ввести сколь угодно много работоспособных состояний с различным уровнем эффективности функционирования, определяемым степенью приближения погрешности к допустимым граничным значениям.

Понятие метрологического отказа является в известной степени условным, поскольку определяется допуском на МХ, который в общем случае может меняться в зависимости от конкретных условий. Важно и то, что зафиксировать точное время наступления метрологического отказа ввиду скрытого характера его проявления невозможно, в то время как явные отказы, с которыми оперирует классическая теория надежности, могут быть обнаружены в момент их возникновения. Все это потребовало разработки специальных методов анализа метрологической надежности СИ [17, 27].

Надежность СИ характеризует его поведение с течением времени и является обобщенным понятием, включающим стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность (для восстанавливаемых СИ) и сохраняемость.

Стабильность средства измерения является качественной характеристикой, отражающей неизменность во времени его МХ. Она описывается временными зависимостями параметров закона распределения погрешности. Метрологическая надежность и стабильность являются различными свойствами одного и того же процесса старения СИ. Стабильность несет больше информации о постоянстве метрологических свойств средства измерений. Это как бы его «внутреннее» свойство. Надежность, наоборот, является «внешним» свойством, поскольку зависит как от стабильности, так и от точности измерений и значений используемых допусков.

Безотказность называется свойство СИ непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени. Она характеризуется двумя состояниями: работоспособным и неработоспособным. Однако для сложных измерительных систем может иметь место и большее число состояний, поскольку не всякий отказ приводит к полному прекращению их функционирования. Отказ является случайным событием, связанным с нарушением или прекращением работоспособности СИ. Это обуславливает случайную природу показателей безотказности, главным из которых является распределение времени безотказной работы СИ.

Долговечность – это свойство СИ сохранять свое работоспособное состояние до наступления предельного состояния. *Работоспособным* называется такое состояние СИ, при котором все его МХ соответствуют нормированным значениям. *Предельным* называется состояние СИ, при котором его применение недопустимо.

После метрологического отказа характеристики средства измерения соответствующими регулировками могут быть возвращены в допустимые диапазоны. Процесс проведения регулировок может быть более или менее длительным в зависимости от характера метрологического отказа, конструкции СИ и ряда других причин. Поэтому в характеристику надежности введено понятие «ремонтпригодность».

Ремонтпригодность – свойство СИ, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, восстановлению и поддержанию его работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Оно характеризуется затратами времени и средств на восстановление СИ после метрологического отказа и поддержание его в работоспособном состоянии.

Процесс изменения МХ идет непрерывно и независимо от того, используется ли СИ или оно хранится на складе. Свойство СИ сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности как в течение эксплуатации, так и после хранения и транспортирования называется его *сохраняемостью*.

6.5.2. Изменение метрологических характеристик средств измерений в процессе эксплуатации

Метрологические характеристики СИ могут изменяться в процессе эксплуатации. В дальнейшем будем говорить об изменениях погрешности $\Delta(t)$, подразумевая, что вместо нее может быть аналогичным образом рассмотрена любая другая МХ.

Изменение МХ средств измерений во времени обусловлено процессами старения в его узлах и элементах, вызванными взаимодействием с внешней окружающей средой. Эти процессы протекают в основном на молекулярном уровне и не зависят от того, находится ли СИ в эксплуатации или хранится на консервации. Следовательно, основным фактором, определяющим старение СИ, является календарное время, прошедшее с момента их изготовления, т.е. возраст. Скорость старения зависит, прежде всего, от используемых материалов и технологий. Исследования [4, 18] показали, что необратимые процессы, изменяющие погрешность, протекают очень медленно и зафиксировать эти изменения в ходе эксперимента в большинстве случаев невозможно. В связи с этим большое значение приобретают различные математические методы, на основе которых строятся модели изменения погрешностей и производится прогнозирование метрологических отказов.

Задача, решаемая при определении метрологической надежности СИ, состоит в нахождении начальных изменений МХ и построении математической модели, экстраполирующей полученные результаты на большой интервал времени. Поскольку изменение МХ во времени – случайный процесс, то основным инструментом построения математических моделей является теория случайных процессов.

Изменение погрешности СИ во времени представляет собой случайный нестационарный процесс. Множество его реализаций показано на рис. 6.9 в виде кривых Δ_i модулей погрешности. В каждый момент t_i они характеризуются некоторым законом распределения плотности вероятности $p(\Delta, t_i)$ (кривые 1 и 2 на рис. 6.9, а). В центре полосы (кривая $\Delta_{cp}(t)$) наблюдается наибольшая плотность появления погрешностей, которая постепенно уменьшается к границам полосы, теоретически стремясь к нулю при бесконечном удалении от центра. Верхняя и нижняя границы полосы погрешностей СИ могут быть представлены лишь в виде некоторых квантильных границ, внутри которых заключена большая часть погрешностей, реализуемых с доверительной вероятностью P . За пределами границ с вероятностью $(1-P)/2$ находятся погрешности, наиболее удаленные от центра реализации.

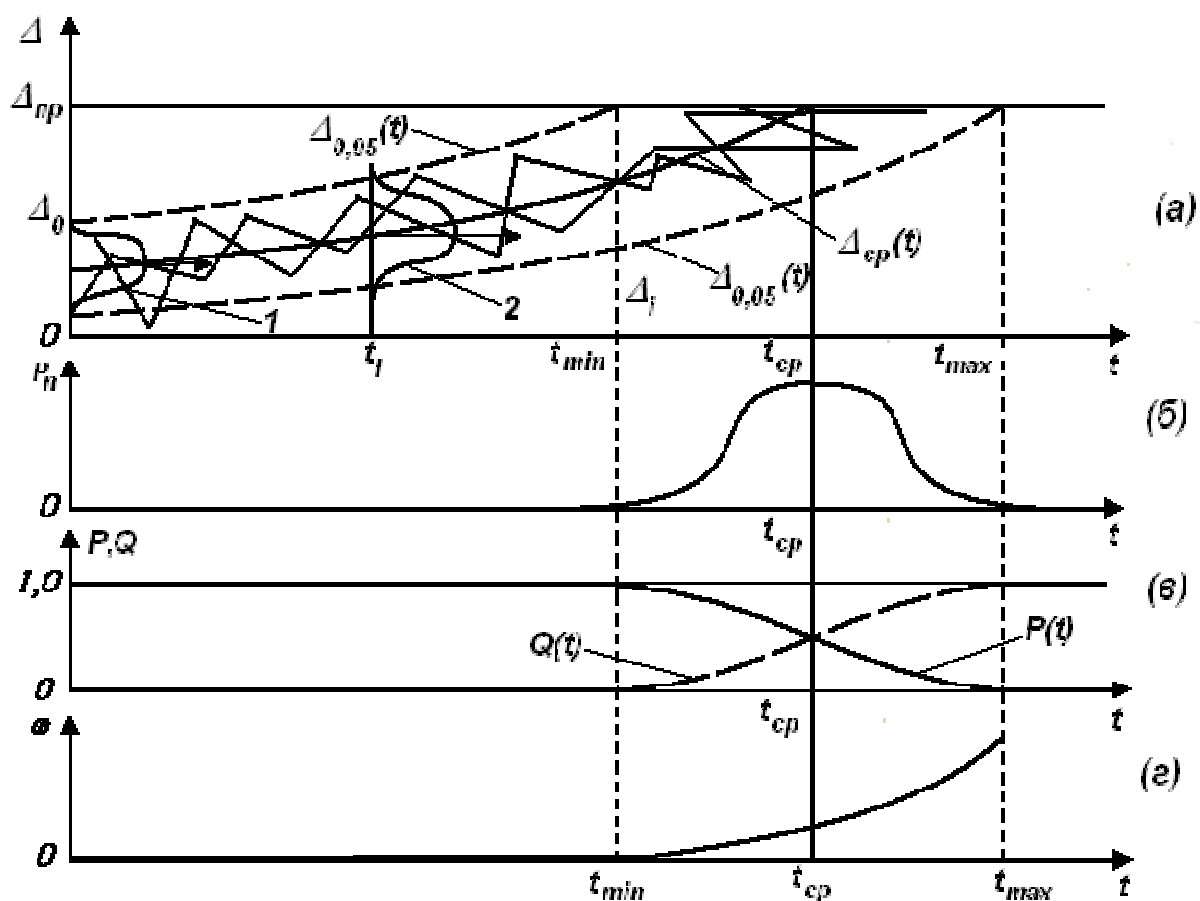


Рис. 6.9. Модель изменения погрешности во времени (а), плотность распределения времени наступления метрологических отказов (б), вероятность безотказной работы (в) и зависимость интенсивности метрологических отказов от времени (г)

Для применения квантильного описания границ полосы погрешностей в каждом ее сечении t_i необходимо знать оценки математического ожидания $\Delta_{cp}(t)$ и СКО $S_{\Delta}(t_i)$ отдельных реализаций Δ_i . В каждом сечении t_i значение погрешности на границах $\Delta_r(t_i) = \Delta_{cp}(t) \pm kS_{\Delta}(t_i)$, где k – квантильный множитель, соответствующий заданной доверительной вероятности P , значение которого зависит от вида закона распределения погрешностей по сечениям. Определить вид этого закона при исследовании процессов старения СИ практически не представляется возможным. Это связано с тем, что законы распределения могут претерпевать значительные изменения с течением времени.

Для решения данной проблемы предлагается [18] использовать общее для высокоэнтропийных симметричных законов распределения свойство, состоящее в том, что при доверительной вероятности $P = 0,9$ соответствующие 5%- и 95%-ный квантили отстоят от центра распределения $\Delta_{cp}(t)$ на $\pm 1,6S_{\Delta}(t)$. Если предположить, что закон распределения погрешностей, деформируясь со временем, остается высокоэнтропийным и симметричным, то 95%-ный квантиль

нестационарного случайного процесса изменения погрешности во времени может быть описан уравнением.

Метрологический отказ наступает в точке пересечения кривой Δ_i и прямых $\pm\Delta_{np}$. Отказы могут наступать в различные моменты времени в диапазоне от t_{\min} до t_{\max} (см. рис. 6.9, а), причем эти моменты соответствуют точкам пересечения 5%- и 95%-ного квантилей с линией допустимого значения погрешности. При достижении кривой $\Delta_{0,95}(t)$ допустимого предела Δ_{np} у 5% приборов наступает метрологический отказ. Распределение моментов наступления таких отказов будет характеризоваться плотностью вероятности $p_H(t)$, показанной на рис 6.9, б. Таким образом, в качестве модели нестационарного случайного процесса изменения во времени модуля погрешности СИ целесообразно использовать зависимость изменения во времени 95%-ного квантиля этого процесса.

Зависимость $\Delta_{0,95}(t)$ может быть описана [18] посредством линейной, экспоненциальной и логистической моделей, применимых к различным интервалам жизненного цикла СИ. Одним из вариантов моделирования изменения погрешности СИ, начиная с первых секунд его эксплуатации, является спектральное представление погрешности [18]. Оно позволяет подробно описать многие особенности изменения погрешности прибора. Главный недостаток такой модели состоит в очень большом объеме экспериментальных данных, необходимых для построения спектральных кривых.

Показатели точности, метрологической надежности и стабильности СИ соответствуют различным функционалам, построенным на траекториях изменения его МХ $\Delta_i(t)$. Точность СИ характеризуется значением МХ в рассматриваемый момент времени, а по совокупности средств измерений – распределением этих значений, представленных кривой 1 для начального момента и кривой 2 для момента t_i . Метрологическая надежность характеризуется распределением моментов времени наступления метрологических отказов (см. рис. 6.9, б). Стабильность СИ характеризуется распределением приращений МХ за заданное время.

6.5.3. Показатели метрологической надежности средств измерений

В технике используется большое число показателей надежности, которые приведены в стандарте ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике. Термины и определения». Рассмотрим основные из них, нашедшие применение в теории метрологической надежности. Знание показателей метрологической надежности позволяет потребителю оптимально использовать СИ, планировать мощности ремонтных участков, размер резервного фонда приборов, обоснованно назначать межповерочные

интервалы и грамотно проводить мероприятия по техническому обслуживанию СИ.

Стабильность СИ характеризуется плотностью распределения приращения погрешности $\Delta[\Delta(t)] = \Delta_{0,95}(t) - \Delta_0$. Среди показателей безотказности наибольшее распространение получили вероятность безотказной работы за заданное время t , средняя и гамма-процентная наработка до отказа и интенсивность отказов. *Вероятность безотказной работы* средства измерения $P(t)$ – это вероятность того, что в течение времени t нормированные МХ не выйдут за допускаемые пределы, т.е. не наступит метрологический отказ. *Наработкой* называется продолжительность работы СИ, а *наработкой до отказа* – продолжительность работы от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

Вероятность $P(t)$ является функцией времени и задается аналитически либо таблицей или графиком (см. рис. 6.9, в). Например, если в течение 1000 ч вероятность безотказной работы $P(t) = 0,97$, то это означает, что в среднем из большого числа СИ данного типа около 97% проработают более 1000 ч. Вероятность $P(t)$ изменяется от нуля до единицы. Чем она ближе к единице, тем выше безотказность работы СИ. На практике допустимым считается значение $P(t) \geq 0,9$. Вероятность безотказной работы СИ в интервале от 0 до t определяется по формуле

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t p_H(t) dt = \int_t^{\infty} p_H(t) dt,$$

где $F(t)$, $p_H(t)$ – интегральная и дифференциальная функции распределения наработки до отказа соответственно; $Q(t)$ – вероятность отказа.

Средней наработкой до отказа называется математическое ожидание наработки СИ до первого отказа:

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} t p_H(t) dt.$$

Гамма-процентная наработка до отказа t_g – это наработка, в течение которой отказ объекта не возникает с вероятностью g , выраженной в процентах. Она определяется из уравнения

$$P(t_g) = 1 - F(t_g) = 1 - \int_0^{t_g} p_H(t) dt = \frac{g}{100}.$$

При $g = 100\%$ гамма-процентная наработка называется установленной безотказной наработкой, а при $g = 50\%$ – медианной наработкой.

Частота (интенсивность) отказов $w(t)$ определяется как условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого СИ,

которая находится для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник:

$$w(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{p_H(t)}{P(t)} = p_H(t) \Big/ \int_t^{\infty} p_H(t) dt. \quad (6.3)$$

Вероятность того, что СИ, проработавшее безотказно в течение времени t , откажет в последующий малый промежуток времени dt , равна $w(t)dt$. Вероятность безотказной работы выражается через интенсивность отказов следующим образом:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t w(t) dt\right).$$

Из теории надежности известно [18], что при постепенных отказах, к которым относятся и метрологические, плотность распределения наработки до отказа распределяется в основном по одному из четырех законов: экспоненциальному, нормальному, логнормальному и Вейбулла. Выбор того или иного закона должен производиться только на основе экспериментальных исследований. При нормальном законе

$$p_H(t) = \frac{1}{s\sqrt{2p}} \exp\left[-(t - T_{cp})^2 / (2s^2)\right],$$

Где T_{cp} , s – параметры распределения. В этом случае $P(t) = 1 - \Phi[(t - T_{cp})/s]$, где $\Phi(z)$ – функция Лапласа.

Интенсивность отказов описывается выражением, полученным с использованием формулы (6.3):

$$w(t) = \frac{1}{s\sqrt{2p}} \exp\left[-(t - T_{cp})^2 / (2s^2)\right] \Big/ \left[1 - \Phi\left(\frac{t - T_{cp}}{s}\right)\right].$$

Для использования этих формул необходимо знать средний срок службы T_{cp} и его СКО s , которые находятся экспериментально при испытаниях СИ на надежность.

Основными показателями долговечности являются средние и гамма-процентные сроки службы и ресурсы. *Срок службы* – это календарная продолжительность работы СИ от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние. Он измеряется в годах или месяцах. *Средним сроком службы* называется математическое ожидание срока службы:

$$\bar{T}_{cl} = \int_0^{\infty} t f_{cl}(t) dt,$$

где f_{cl} – плотность распределения срока службы для совокупности СИ данного типа.

Гамма-процентный срок службы – это календарная продолжительность от начала эксплуатации СИ, в течение которой оно не достигнет

предельного состояния с заданной вероятностью g , выраженной в процентах. Он определяется из уравнения

$$P(T_{clg}) = 1 - \int_0^{T_{clg}} f_{cl}(t) dt = \frac{g}{100}.$$

Ресурсом называется наработка СИ от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние. Другими словами, ресурс – запас возможной наработки СИ. *Средним ресурсом* называется математическое ожидание ресурса

$$\bar{T}_p = \int_0^{\infty} t f_p(t) dt,$$

где $f_p(t)$ – плотность распределения ресурса для совокупности СИ данного типа.

Гамма-процентный ресурс – это наработка, в течение которой СИ не достигнет своего предельного состояния с заданной вероятностью g , выраженной в процентах. Он определяется из уравнения

$$P(T_{pg}) = 1 - \int_0^{T_{pg}} f_p(t) dt = \frac{g}{100}.$$

Срок службы (средний или гамма-процентный) акцентирует внимание на календарной продолжительности эксплуатации и помимо времени непосредственной работы СИ включает в себя время хранения его на складе, нахождения в выключенном состоянии, транспортировку, ремонт и т.д. При нормировании он задается в годах. Ресурс (средний или гамма-процентный) представляет собой чистую наработку изделия, находящегося во включенном состоянии, и нормируется в часах.

В качестве показателей ремонтпригодности используются вероятность и среднее время восстановления работоспособности СИ. *Вероятностью восстановления работоспособного состояния* называется вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния СИ не превысит заданное значение. Она представляет собой значение функции распределения времени восстановления при $t = T_{зад}$, где $T_{зад}$ – заданное время восстановления. *Средним временем восстановления работоспособного состояния* называется математическое ожидание времени восстановления, определяемое по его функции распределения.

Сохраняемость СИ характеризуется *сроком сохраняемости* – календарной продолжительностью его хранения и (или) транспортирования, в течение и после которого значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности сохраняются в установленных пределах. Показателями сохраняемости являются *средний срок сохраняемости* – математическое ожидание, определяемое по функции распределения сроков сохраняемости совокупности СИ одного типа, и *гамма-процентный срок сохраняемости*.

6.5.4. Метрологическая надежность и межповерочные интервалы

Одной из основных форм поддержания СИ в метрологически исправном состоянии является его периодическая поверка. Она проводится метрологическими службами согласно правилам, изложенным в специальной нормативно-технической документации. Периодичность поверки должна быть согласована с требованиями к надежности СИ. Поверку необходимо проводить через оптимально выбранные интервалы времени, называемые *межповерочными интервалами* (МПИ).

Момент наступления метрологического отказа может выявить только поверка СИ, результаты которой позволят утверждать, что отказ произошел в период времени между двумя последними поверками. Величина МПИ должна быть оптимальной, поскольку частые поверки приводят к материальным и трудовым затратам на их организацию и проведение, а редкие – могут привести к повышению погрешности измерений из-за метрологических отказов.

Межповерочные интервалы устанавливаются в календарном времени для СИ, изменение метрологических характеристик которых обусловлено старением и не зависит от интенсивности эксплуатации. Значения МПИ рекомендуется выбирать из следующего ряда: 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 9; 12; 6K месяцев, где K – целое положительное число. Для СИ, у которых изменение МХ является следствием износа его элементов, зависящего от интенсивности эксплуатации, МПИ назначаются в значениях наработки.

При нахождении МПИ выбирается МХ, определяющая состояние метрологической исправности средства измерений. В качестве таких характеристик, как правило, используются основная погрешность, СКО случайной составляющей погрешности и др. Если состояние метрологической исправности определяют несколько МХ, то из них выбирается та, по которой обеспечивается наибольший процент брака при поверках.

В настоящее время существуют три основных пути определения продолжительности МПИ:

- на основе статистики отказов;
- на основе экономического критерия;
- произвольное назначение первоначального МПИ с последующей корректировкой в течение всего срока службы СИ.

Выбор конкретного метода определения продолжительности МПИ зависит от наличия исходной информации о надежности и стабильности СИ. Первый способ является эффективным при условии, что известны показатели метрологической надежности. Наиболее полная информация такого рода содержится в моделях, описывающих изменение во времени МХ средств измерений. При известных параметрах моделей МПИ определяется моментом выхода погрешности за нормируемый для данного СИ допуск. Однако большой разброс параметров и характеристик процессов старения СИ приводит при расчете МПИ с помощью таких моделей к большой погрешности.

Основанные на статистике скрытых и явных отказов, они требуют наличия большого количества экспериментальных данных по процессам изменения во времени МХ средств измерений различных типов. Такого рода исследования весьма трудоемки и занимают значительное время. Этим объясняется тот факт, что опубликованных статистических данных о процессах старения приборов различных типов крайне мало. В технических описаниях СИ, как правило, приводится средняя наработка до отказа, средний или гамма-процентный ресурс и срок службы. Этого явно недостаточно для расчета МПИ.

Определение межповерочного интервала по экономическому критерию состоит в решении задачи по выбору такого интервала, при котором можно минимизировать расходы на эксплуатацию СИ и устранять последствия от возможных ошибок, вызванных погрешностями измерения. Исходной информацией для определения МПИ служат данные о стоимости поверки и ремонта СИ, а также об ущербе от изъятия его из эксплуатации и от использования метрологически неисправного прибора. Основная сложность применения этого метода состоит в следующем. Затраты на ремонт и поверку СИ достаточно легко определяются по нормативным документам. В отличие от них потери из-за использования приборов со скрытым метрологическим отказом на практике к правилу, неизвестны. Приходится прибегать к приближенным моделям, описывающим затраты на эксплуатацию СИ со скрытыми метрологическими отказами в виде функции потерь того или иного вида.

Один из вариантов определения МПИ по экономическому критерию приведен в рекомендации МИ 2187–92 «ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений».

Наиболее универсальным является метод, состоящий в произвольном назначении МПИ с последующей корректировкой его величины. В этом случае при минимальной исходной информации назначается первоначальный интервал, а результаты последующих поверок являются исходными данными для его корректировки.

Основной трудностью указанного метода является назначение первого МПИ. Преодолеть ее можно тремя путями [18]. Во-первых, для определения протяженности первого МПИ могут быть использованы показатели метрологической надежности проверяемого СИ. Во-вторых, длительность первого интервала может быть оценена исходя из анализа данных по эксплуатации аналогичных проверяемому по конструкции и технологии производства СИ. В-третьих, первый МПИ выбирается в соответствии с рекомендациями нормативных документов государственных и ведомственных метрологических служб. Последующие значения МПИ определяются путем корректировки первого интервала с учетом результатов проведенных поверок большого числа однотипных СИ.

Данный метод рассмотрен в рекомендации МИ 1872–88 «ГСИ. Межповерочные интервалы образцовых средств измерений. Методика

определения и корректировки» и в международном стандарте ИСО 10012–1 «Требования, гарантирующие качество измерительного оборудования».

6.6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «средство измерений» и определите, в чем заключается метрологическая сущность СИ.
2. Поясните, что такое элементарные СИ и приведите примеры таких СИ.
3. Поясните, чем СИ отличается от измерительного преобразователя.
4. Определите отличия и сходства между измерительным преобразователем, устройством сравнения и мерой.
5. Из каких блоков состоит обобщенная структурная схема СИ.
6. Запишите в общем виде выражение для выходного сигнала. Поясните качественные отличия параметров выходного сигнала.
7. Проведите классификацию СИ по роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений и по уровню автоматизации.
8. Проведите классификацию СИ по роли в процессе измерения и выполняемым функциям.
9. Как называются характеристики свойств СИ, оказывающие влияние на результат измерения и его погрешности?
10. Перечислите основные группы нормируемых метрологических характеристик СИ.
11. Поясните, что такое класс точности СИ.
12. Является ли класс точности СИ непосредственной оценкой точности измерений, выполняемых этим СИ?
13. Что такое динамический диапазон измерения?
14. Может ли средство измерения иметь несколько классов точности?
15. Что такое отказ? Поясните различия между различными видами отказов: неметрологическими, метрологическими, внезапными, постепенными.
16. Поясните, чем отличаются понятия метрологическая исправность и метрологическая надежность средства измерений?
17. Сформулируйте определение и назовите основные показатели стабильности, безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости средств измерений.
18. Поясните сущность основных показателей безотказности: вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, интенсивность отказов.
19. Приведите математические описания вероятности безотказной работы за заданное время t , средней наработки до отказа, гамма-процентной наработки до отказа, интенсивности отказов.
20. Запишите вероятность безотказной работы через интенсивность отказов.

РАЗДЕЛ 7. ОСНОВЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ

7.1. Цели и задачи

Стандартизация – это деятельность по установлению норм, правил и характеристик как обязательных для выполнения, так и рекомендованных.

Цель стандартизации – достижение оптимальной степени упорядочения в той или иной области посредством широкого и многократного использования установленных положений, требований, норм для решения реально существующих, планируемых или потенциальных задач. Основными результатами деятельности по стандартизации должны быть повышение степени соответствия продукта (услуги), процессов их функциональному назначению, устранению технических барьеров в международном товарообмене, содействию научно-техническому прогрессу и сотрудничеству в различных областях.

Цели стандартизации можно разделить на общие и более узкие, касающиеся обеспечения соответствия.

Общие цели:

- безопасность продукции, работ и услуг для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;
- техническая и информационная совместимость, а также взаимозаменяемость продукции;
- качество продукции, работ и услуг в соответствии с уровнем развития науки, техники и технологии;
- единство измерений;
- экономия всех видов ресурсов;
- безопасность хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф и других чрезвычайных ситуаций;
- обороноспособность и мобилизационная готовность страны.

Конкретные цели стандартизации относятся к определенной области деятельности, отрасли производства товаров и услуг, тому или другому виду продукции, предприятию и т.п.

Стандартизация направлена на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления положений для всеобщего и многократного применения в отношении реально существующих или потенциальных задач.

Аспект стандартизации – направление стандартизации выбранного объекта стандартизации, характеризующее определенное свойство (или группу свойств) данного объекта.

Так, аспектами стандартизации конкретной продукции являются:

- термины и определения;
- условные обозначения и сокращения;

- классификация, требования к главным параметрам и (или) размерам (показателям целевого или функционального назначения);
- требования к основным показателям уровня качества (полезности);
- требования к основным показателям уровня экономичности;
- требования к комплексности продукции;
- требования к методам и средствам хранения и транспортировки;
- требования безопасности продукции для жизни, здоровья и имущества при ее производстве, обращении и потреблении;
- требования охраны окружающей природной среды (требования к экологически опасным свойствам продукции при ее производстве, обращении и потреблении);
- требования к правилам и средствам приемки продукции;
- требования к маркировке продукции;
- требования к упаковке продукции, транспортной и потребительской таре.

Стандартизация осуществляется на разных уровнях (рис.7.1):

- международная стандартизация;
- региональная стандартизация;
- национальная стандартизация – в одном конкретном государстве;
- административно-территориальная стандартизация.



Рис. 7.1. Уровни стандартизации

Международная стандартизация – участие в стандартизации открыто для соответствующих органов любой страны.

Региональная стандартизация – деятельность открыта только для соответствующих органов государств одного географического, политического или экономического региона мира.

Национальная стандартизация – стандартизация в одном конкретном государстве. При этом национальная стандартизация также может осуществляться на разных уровнях: на государственном, отраслевом

уровне, в том или ином секторе экономики, на уровне ассоциаций, производственных фирм, предприятий и учреждений.

Административно-территориальная стандартизация – стандартизация, которая проводится в административно-территориальной единице (области, крае и т.п.)

В процессе стандартизации вырабатываются нормы, правила, требования, характеристики, касающиеся объекта стандартизации, оформляемые в виде нормативного документа.

Стандарт – нормативный документ, разработанный на основе соглашения большинства заинтересованных сторон и утвержденный признанным органом (или предприятием), в котором устанавливаются общие принципы, характеристики, требования и методы, касающиеся определенных объектов стандартизации, направленных на упорядочение и оптимизацию работы в определенной области.

Показателями стандартов являются характеристики объектов стандартизации, выраженные с помощью условных единиц, обозначений или понятий. Показатели могут быть даны в виде размеров, химического состава, физических свойств, весов, эксплуатационных качеств, экономичности, надежности, долговечности.

В стандартизации стандарт рассматривается как одна из разновидностей нормативных документов. Однако, в практике термин «стандарт» может употребляться и по отношению к эталону, образцу или описанию продукта, процесса (услуги). По существу это не является принципиальной ошибкой, хотя эталон правильнее относить к области метрологии, а термин «стандарт» использовать применительно к нормативному документу.

Предварительный стандарт – это временный документ, который применяется органом по стандартизации и доводится до широкого круга потенциальных потребителей, а также тех, кто может его применить. Информация, полученная в процессе использования предварительного стандарта, и отзывы об этом документе служат базой для решения вопроса о целесообразности принятия стандарта.

Документ технических условий - устанавливает технические требования к продукции, услуге, процессу. Обычно в документе технических условий должны быть указаны методы или процедуры, которые следует использовать для проверки соблюдения требований данного нормативного документа в таких ситуациях, когда это необходимо.

Свод правил – как и предыдущий нормативный документ, может быть как самостоятельным документом, так и частью стандарта. Свод правил обычно разрабатывается для процессов проектирования, монтажа оборудования и конструкций, технического обслуживания или эксплуатации объектов, конструкций, изделий. Технические правила, содержащиеся в документе, носят рекомендательный характер.

Регламент – это документ, в котором содержатся обязательные правовые нормы. Принимает регламент орган власти, а не орган по стандартизации, как в случае других нормативных документов. Разновидность регламентов – *технический регламент* – содержит технические требования к объекту стандартизации. Они могут быть представлены непосредственно в самом документе, либо путем ссылки на другой нормативный документ (стандарт, свод правил, документ технических условий) В отдельных случаях в технический регламент полностью включается нормативный документ. Технические регламенты обычно дополняются методическими документами, как правило, указаниями по методам контроля или проверок соответствия продукта (услуги, процесса) требованиям регламента.

7.2. Методы и формы стандартизации

Метод стандартизации – это прием или совокупность приемов, с помощью которых достигаются цели стандартизации.

Стандартизация базируется на общенаучных и специфических методах. Ниже рассматриваются широко применяемые в работах по стандартизации методы (рис. 7.2):

- упорядочение объектов стандартизации;
- параметрическая стандартизация;
- унификация продукции;
- агрегатирование;
- комплексная стандартизация;
- опережающая стандартизация.

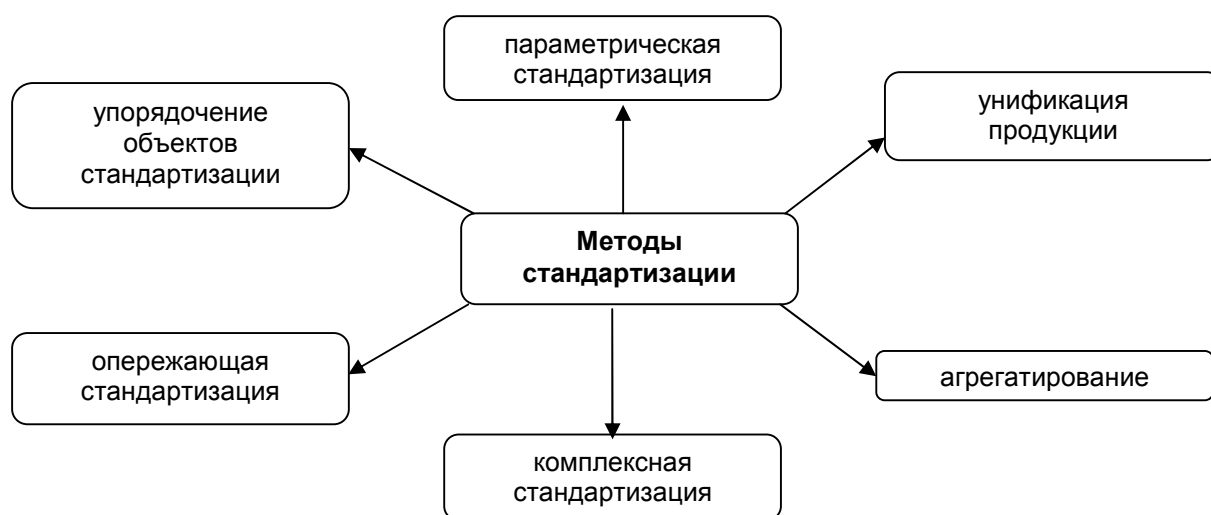


Рис. 7.2. Методы стандартизации

В зависимости от последующего влияния на развитие народного хозяйства можно выделить три вида стандартизации, принципиально отличающиеся подходом к установлению в стандартах соответствующих норм:

- *стандартизация по достигнутому уровню*, устанавливающая показатели, отражающие свойства существующей и освоенной в производстве продукции, и, таким образом, фиксирующая достигнутый уровень производства;
- *опережающая стандартизация*, заключающаяся в установлении повышенных по отношению к уже достигнутому на практике уровню норм;
- *комплексная стандартизация*, при которой для оптимального решения конкретной проблемы осуществляется целенаправленное и планомерное установление и применение системы взаимосвязанных требований как к самому объекту комплексной стандартизации в целом, так и к его основным элементам. Примерами объектов комплексной стандартизации являются аппаратура и оборудование для радиовещания и телевидения, аппаратура проводной связи, аппаратура записи и воспроизведения звука и т.п.

Каждый вид стандартизации подразумевает свою индивидуальную структуру организации. На рис. 7.3 приведен пример структуры службы стандартизации.

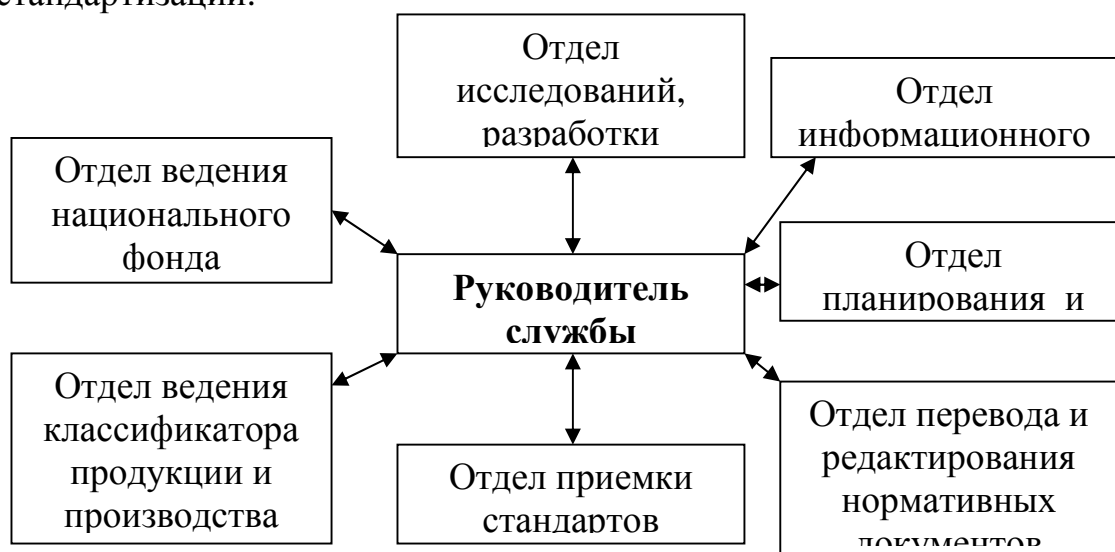


Рис. 7.3. Структура службы стандартизации

В зависимости от метода решения основной задачи различают несколько форм стандартизации (рис.7.4).

Симплификация – форма стандартизации, заключающаяся в простом сокращении числа применяемых при разработке изделия или при его производстве марок полуфабрикатов, комплектующих изделий и т.п. до количества, технически и экономически целесообразного, достаточного для выпуска изделий с требуемыми показателями качества. Являясь простейшей формой и начальной стадией более сложных форм стандартизации, симплификация оказывается экономически выгодной, так как приводит к упрощению производства, облегчает материально-техническое снабжение, складирование, отчетность.

Унификация – рациональное уменьшение числа типов, видов и размеров объектов одинакового функционального назначения. Объектами унификации наиболее часто являются отдельные изделия, их составные части, детали, комплектующие изделия, марки материалов и т. п. Проводится унификация на основе анализа и изучения конструктивных вариантов изделий, их применяемости путем сведения близких по назначению, конструкции и размерам изделий, их составных частей и деталей к единой типовой (унифицированной) конструкции.

В настоящее время унификация является наиболее распространенной и эффективной формой стандартизации. Конструирование аппаратуры, машин и механизмов с применением унифицированных элементов позволяет не только сократить сроки разработки и уменьшить стоимость изделий, но и повысить их надежность, сократить сроки технологической подготовки и освоения производства.

Типизация – это разновидность стандартизации, заключающаяся в разработке и установлении типовых решений (конструктивных, технологических, организационных и т. п.) на основе наиболее прогрессивных методов и режимов работы. Применительно к конструкциям типизация состоит в том, что некоторое конструктивное решение (существующее или специально разработанное) принимается за основное – базовое для нескольких одинаковых или близких по функциональному назначению изделий. Требуемая же номенклатура и варианты изделий строятся на основе базовой конструкции путем внесения в нее ряда второстепенных изменений и дополнений.

Агрегатирование – метод создания новых машин, приборов и другого оборудования путем компоновки конечного изделия из ограниченного набора стандартных и унифицированных узлов и агрегатов, обладающих геометрической и функциональной взаимозаменяемостью.

Возможность многократного применения элементов набора в различных модификациях машин и приборов одного класса или близких по назначению обеспечивает конструктивную преемственность при создании новых изделий, позволяет использовать освоенные в производстве узлы и агрегаты, значительно сокращает трудоемкость проектирования, изготовления и ремонта изделий, повышает уровень взаимозаменяемости продукции, способствует специализации предприятий, механизации и автоматизации производственных процессов, улучшает качество продукции, а также облегчает перестройку производства при переходе предприятий на освоение новой продукции.

7.3. Нормативные документы по стандартизации в РФ

В настоящее время сформировалась государственная система стандартизации Российской Федерации (ГСС), которая регламентирует

процессы построения, изложения и распространения стандартов в Российской Федерации. ГСС включает 5 основополагающих стандартов.

Нормативные документы по стандартизации в РФ делятся на следующие разновидности (рис. 7.5):

- государственные стандарты России (ГОСТ);
- отраслевые стандарты (ОСТ);
- стандарты научно-технических и инженерных объединений;
- технические условия (ТУ);
- стандарты предприятий.

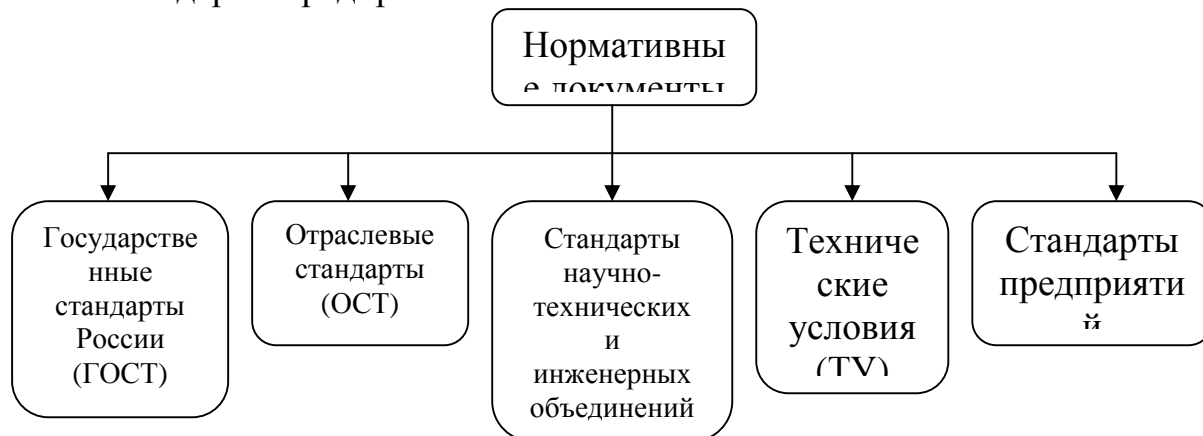


Рис. 7.4. Нормативные документы

Государственные стандарты России содержат обязательные и рекомендационные требования. К обязательным относятся:

- требования, обеспечивающие безопасность продукции для жизни, здоровья и имущества граждан, ее совместимость и взаимозаменяемость, охрану окружающей среды, и требования к методам испытаний этих показателей;
- требования техники безопасности и гигиены труда со ссылками на соответствующие санитарные нормы и правила;
- метрологические нормы, правила, требования и положения, которые обеспечивают достоверность и точность измерений;
- положения, которые обеспечивают техническую совместимость во время разработки, изготовления, эксплуатации продукции.

Рекомендационные требования государственных стандартов России подлежат безусловному исполнению, если:

- это предусмотрено соответствующими законодательными актами;
- эти требования включены в договора на разработку, изготовление и поставку продукции;
- изготовителем (поставщиком) продукции сделано заявление на соответствие продукции этим стандартам.

Обязательные требования государственных стандартов подлежат безусловному исполнению органами государственной исполнительной

власти, всеми предприятиями, их объединениями, организациями и гражданами – субъектами предпринимательской деятельности; на деятельность которых распространяется действие стандартов.

Технические условия (ТУ) - это технический документ, который разрабатывается по решению разработчика (изготовителя) или по требованию заказчика (потребителя) продукции. ТУ могут быть разработаны на одно конкретное изделие, материал, вещество и т.п. или на несколько конкретных изделий, материалов, веществ и т.п. (групповые технические условия). Требования к продукции, устанавливаемые в технических условиях, не могут противоречить требованиям стандартов (государственных или межгосударственных) на данную продукцию, а также требованиям технических регламентов.

ТУ являются частью нормативной базы подтверждения соответствия при добровольной сертификации. Технические условия входят в комплект конструкторской или другой технической документации на продукцию. Если же такая документация отсутствует, то ТУ должны содержать полный комплекс требований к продукции, ее изготовлению, контролю и приемке.

ГОСТ Р 2.114-95 "Единая система конструкторской документации" устанавливает единые правила построения, изложения, оформления, согласования и утверждения технических условий на продукцию (изделия, материалы, вещества и т.п.). Согласно положениям данного стандарта, в технических условиях должна быть вводная часть и расположенные в указанном порядке разделы:

- технические требования;
- требования безопасности;
- требования охраны окружающей среды;
- правила приемки;
- методы контроля;
- транспортирование и хранение;
- указания по эксплуатации;
- гарантии изготовителя.

При необходимости в ТУ могут быть включены дополнительные разделы, или же исключены, какие-либо из приведенных в стандарте, при условии обоснования для их исключения.

На соответствие требованиям технических условий проводится сертификация нестандартизированной в Российской Федерации продукции. Документ, по которому выпускается продукция (например, технические условия), указывается в сертификате соответствия, в разделе «Продукция». Также ТУ являются основным документом, необходимым для принятия решения уполномоченными управлениями Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия

человека (Роспотребнадзора) при санитарно-эпидемиологической оценке отечественной продукции.

Перечень необходимых данных для разработки ТУ:

- код ОКПО изготовителя;
- наименование изделия, перечень модификаций;
- описание технологического процесса;
- таблица технических параметров;
- перечень комплектующих изделий;
- порядок и условия предъявления и приемки продукции органами технического контроля предприятия-изготовителя;
- методы и средства контроля испытаний;
- способы упаковки и упаковочный материал, перечень документов, вкладываемых в упаковку;
- транспортировка (виды транспорта и транспортного средства, параметры транспортировки);
- условия хранения;
- условия эксплуатации;
- сроки гарантии.

Отраслевые стандарты разрабатываются на продукцию при отсутствии государственных стандартов России или в случае необходимости установления требований, которые превышают или дополняют требования государственных стандартов. Обязательные требования отраслевых стандартов подлежат безусловному исполнению предприятиями, их объединениями и организациями, которые входят в сферу управления органа, который их утвердил.

Стандарты научно-технических и инженерных объединений разрабатываются в случае необходимости расширения результатов фундаментальных исследований в сфере профессиональных интересов. Эти стандарты могут использоваться на основе добровольной договоренности.

7.3.1. Виды стандартов

В зависимости от специфики объекта стандартизации и содержания устанавливаемых к нему требований разрабатывают стандарты следующих видов:

- стандарты основополагающие;
- стандарты на продукцию, услуги;
- стандарты на работы (процессы);
- стандарты на методы контроля (испытаний, измерений, анализа).

Основополагающие стандарты устанавливают общие организационно-технические положения для определенной области деятельности, а также общетехнические требования, нормы и правила,

обеспечивающие взаимопонимание, техническое единство и взаимосвязь различных областей науки, техники и производства в процессах создания и использования продукции, охрану окружающей среды, безопасность продукции, процессов и услуг для жизни, здоровья, имущества и другие общетехнические требования.

Стандарты на продукцию (услуги) устанавливают требования к группам однородной продукции (услуг) или к конкретной продукции (услуге).

Стандарты на работы (процессы) устанавливают основные требования к методам (способам, приемам, режимам, нормам) выполнения различного рода работ в технологических процессах разработки, изготовления, хранения, транспортирования, эксплуатации, ремонта и утилизации продукции.

Стандарты на методы контроля устанавливают методы (способы, приемы, методики и др.) проведения испытаний, измерений, анализа продукции при ее создании, сертификации и использовании.

7.4. Международная стандартизация

Международная стандартизация – это совокупность международных организаций по стандартизации и продуктов их деятельности – стандартов, рекомендаций, технических отчетов и другой научно-технической продукции. Таких организаций несколько:

- международная организация по стандартизации – ИСО (ISO);
- международная электротехническая комиссия – МЭК (IEC);
- международный союз электросвязи – МСЭ (ITU).

Международная организация по стандартизации (ИСО) – самая крупная и авторитетная из вышеназванных. Основная ее цель сформулирована в Уставе ИСО: “...содействие развитию стандартизации в мировом масштабе для обеспечения международного товарообмена и взаимопомощи, а также для расширения сотрудничества в областях интеллектуальной, научной, технической и экономической деятельности”.

Основное назначение международных стандартов – это создание на международном уровне единой методической основы для разработки новых и совершенствование действующих систем качества и их сертификации.

Стандарты ИСО, аккумулирующие передовой научно-технический опыт многих стран, нацелены на обеспечение единства требований к продукции, являющейся предметом международного товарообмена, включая взаимозаменяемость комплектующих изделий, единые методы испытаний и оценки качества изделий.

Пользователи международных стандартов ИСО – промышленные и деловые круги, правительственные и неправительственные организации, потребители и общество в целом.

Международные стандарты ИСО не имеют статуса обязательных для всех стран-участниц. Любая страна мира вправе применять или не применять их. Решение вопроса о применении международного стандарта ИСО связано в основном со степенью участия страны в международном разделении труда и состоянием ее внешней торговли. В российской системе стандартизации нашли применение около половины международных стандартов ИСО.

В России принят такой порядок внедрения международных стандартов:

- прямое применение международного стандарта без включения дополнительных требований;
- использование аутентичного текста международного стандарта с дополнительными требованиями, отражающими потребности народного хозяйства.

По своему содержанию стандарты ИСО отличаются тем, что лишь около 20% из них включают требования к конкретной продукции. Основная же масса нормативных документов касается требований безопасности, взаимозаменяемости, технической совместимости, методов испытаний продукции, а также других общих и методических вопросов. Таким образом, использование большинства международных стандартов ИСО предполагает, что конкретные технические требования к товару устанавливаются в договорных отношениях.

ИСО определила свои задачи, выделив наиболее актуальные стратегические направления работ:

- установление более тесных связей деятельности организации с рынком, что, прежде всего, должно отражаться на выборе приоритетных разработок;
- снижение общих и временных затрат в результате повышения эффективности работы административного аппарата, лучшего использования человеческих ресурсов, оптимизации рабочего процесса, развития информационных технологий и телекоммуникаций;
- оказание эффективного содействия Всемирной торговой организации путем внедрения программы, ориентированной на постепенную переработку технических условий на поставку товаров в стандарты ИСО;
- стимулирование «самоподдерживающихся» элементов указанной выше программы: поощрение создания новых стандартов для промышленности, развитие взаимоотношений с ВТО на условиях оказания необходимой технической помощи. В частности, предполагается всячески способствовать включению требований к поставляемой продукции со стороны государств в международные

стандарты ИСО, что должно положительно сказаться на признании оценки соответствия;

- забота о повышении качества деятельности по национальной стандартизации в развивающихся странах, где главное внимание уделяется выравниванию уровней стандартизации.

В дальнейшем ИСО планирует расширить сферу предоставляемых технических услуг. ИСО определены три приоритетные направления:

- содействие принятию широко используемых промышленных стандартов, разработанных за рамками ИСО, в качестве международных нормативных документов;
- выявление первоочередных потребностей в стандартизации, касающейся специальных областей;
- повышение гибкости планирования работ по созданию стандартов в ответ на изменяющиеся условия рынка и государств.

Кроме того, довольно быстро растущей областью международной стандартизации по-прежнему остаются услуги, где все шире будут применяться стандарты серии 9000.

Правительства ряда крупных стран передают ответственность за разработку и внедрение стандартов, применяемых для правительственных закупок (особенно оборонными ведомствами), в частный сектор. В этой связи ИСО изучает возможности международной стандартизации в неправительственном секторе. В перспективе будет возрастать значение сотрудничества ИСО, МЭК и МСЭ. Деятельность этих организаций способствует осуществлению эффективных программ стандартизации в области информационных технологий и телекоммуникаций. Потребители рассматривают это сотрудничество как позитивное, способствующее эффективной работе трех главных организаций по международной стандартизации.

7.5. Правовые основы, задачи и организация государственного надзора в области стандартизации

Государственный контроль и надзор за соблюдением обязательных требований государственных стандартов осуществляются в России на основании Закона РФ «О стандартизации» и составляют часть государственной системы стандартизации.

К основным задачам госнадзора можно отнести: предупреждение и пресечение нарушений обязательных требований государственных стандартов, правил обязательной сертификации и Закона «О единстве измерений» всеми субъектами хозяйственной деятельности; предоставление информации органам исполнительной власти и общественным организациям по результатам проверок. Проводят госнадзор должностные лица Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии и подведомственных ему центров

стандартизации и метрологии, получивших статус территориальных органов госнадзора, — государственные инспекторы.

Проверкам госнадзора подвергается продукция (на всех стадиях ее жизненного цикла), в том числе подлежащая обязательной сертификации и импортируемая; услуги населению, виды работ, которые подлежат обязательной сертификации; техническая документация на продукцию; деятельность испытательных центров, лабораторий и органов по сертификации.

Субъекты хозяйственной деятельности обязаны не препятствовать, а оказывать содействие государственным инспекторам во всех их действиях, составляющих процедуру госнадзора: свободный доступ в служебные производственные помещения, привлечение к работе специалистов и имеющих на предприятии технических средств, отбор проб и образцов и т.п. Проверка осуществляется как лично инспектором, так и создаваемыми под его руководством комиссиями.

Права и обязанности государственных инспекторов определены Законом «О стандартизации». Им предоставлены достаточно широкие права, как представителям государственных органов управления, в силу чего они находятся под защитой государства. Права и обязанности государственных инспекторов:

- государственный инспектор имеет право свободного доступа в служебные и производственные помещения проверяемого предприятия (организации), получать всю необходимую документацию, проводить отбор проб и образцов, выдавать предписания об устранении выявленных отклонений, запрещать или приостанавливать поставку (реализацию) продукции, не соответствующей обязательным требованиям государственных стандартов, а также в случае отказа от предъявления ее к проверке;
- по результатам проверок государственный инспектор имеет право облагать нарушителей обязательных требований стандартов штрафами. Строгое наказание применяется и к невыполняющим запрет на реализацию — штраф в размере стоимости реализованной продукции. Запрет на реализацию продукции или услуг при их несоответствии обязательным требованиям российских нормативных документов распространяется и на импортную продукцию (услугу), тем более, если они не прошли сертификацию в соответствии с российским законодательством;
- государственный инспектор имеет право направить необходимые материалы в арбитражный суд, органы прокуратуры или суд, если выданные им предписания или постановления не выполняются предприятием — объектом госнадзора.

Государственным инспекторам предоставлены широкие права, но если они не выполняют возложенные на них обязанности, относятся к ним

ненадлежащим образом или замечены в разглашении государственных (коммерческих) секретов, то несут ответственность в установленном законом порядке. Госинспектор всегда должен помнить, что он защищает интересы как государства, так и потребителя.

Основная форма государственного контроля и надзора — выборочная проверка. В процессе проверки проводятся испытания, измерительный контроль, технический осмотр, идентификация, другие мероприятия, обеспечивающие достоверность и объективность результатов. Контролю подвергается образец (или проба), отбираемый в соответствии с установленной в стандарте на данную продукцию методикой. Идентификация и технический осмотр продукции проводятся государственным инспектором с привлечением специалистов предприятия, а испытания образцов (проб) осуществляют сотрудники проверяемого субъекта хозяйственной деятельности под наблюдением государственного инспектора. Результаты испытания образцов распространяются на всю партию продукции, от которой они отобраны. При отсутствии у проверяемого предприятия испытательной базы испытания должны проводиться в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах).

Совершенствование системы стандартизации, применение международных стандартов – предпосылка для создания предприятием систем обеспечения качества, способных значительно повысить конкурентоспособность отечественной продукции.

Хотя международные рекомендации по стандартизации не являются обязательными для всех государств, однако соответствие продукции нормам международных стандартов определяет ее стоимость и конкурентоспособность на международном рынке. Применение международных стандартов качества открывает обширные возможности для выхода российских предприятий на международный рынок.

Стандартизация является ключевым фактором поддержки ряда направлений государственной политики, таких как конкуренция, внедрение инноваций, устранение торговых барьеров, расширение торговли, защита интересов потребителей, защита окружающей среды и многих других направлений.

Стандартизация, совмещаемая с законодательством, способствует более эффективному техническому регулированию на государственном уровне.

Международная стандартизация позволяет сэкономить время и средства необходимые для разработки национальных стандартов. Таким образом, развитие международной стандартизации предопределяет развитие мировой торговли.

7.6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение термину «стандартизация».
2. Назовите общие цели стандартизации.
3. Приведите определение аспекта стандартизации.
4. Назовите 5 аспектов стандартизации конкретной продукции.
5. Какие можно выделить уровни стандартизации?
6. При стандартизации на каком уровне участие открыто для любой страны?
7. Какой уровень стандартизации используется в одном государстве?
8. Что такое предварительный стандарт?
9. Какая организация принимает регламент?
10. Назовите три вида стандартизации.
11. Что называется симплификацией?
12. Какую форму стандартизации используют для уменьшения числа типов, видов объектов?
13. Является ли типизация разновидностью стандартизации?
14. Перечислите разновидности нормативных документов по стандартизации
15. Является ли ТУ нормативным документом по стандартизации?
16. Как называется стандарт конкретной отрасли?
17. Как называется международная организация по стандартизации?
18. Является ли МЭК (IEC) организацией по стандартизации?
19. Расшифруйте аббревиатуры: ИСО, МЭК, МСЭ.
20. Назовите основные задачи государственного надзора и контроля в области стандартизации.

РАЗДЕЛ 8. ОСНОВЫ СЕРТИФИКАЦИИ

8.1. Цели и объекты сертификации

Сертификация – форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия объектов требованиям технических регламентов, положениям стандартов, сводов правил или условиям договоров.

Сертификация осуществляется в целях:

- удостоверения соответствия продукции, процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, работ, услуг или иных объектов техническим регламентам, стандартам, сводам правил, условиям договоров;
- содействия приобретателям в компетентном выборе продукции, работ, услуг;
- повышения конкурентоспособности продукции, работ, услуг на российском и международном рынках;
- создания условий для обеспечения свободного перемещения товаров по территории Российской Федерации, а также для осуществления международного экономического, научно-технического сотрудничества и международной торговли.

Объектами сертификации являются продукция, процессы производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, работы и услуги, а также иные объекты, в отношении которых стандартами, системами сертификации и договорами устанавливаются требования.

Сертификация бывает двух видов:

- добровольная;
- обязательная.

Добровольная сертификация осуществляется по инициативе заявителя на условиях договора между заявителем и органом по сертификации. Добровольная сертификация может осуществляться для установления соответствия национальным стандартам, стандартам организаций, сводам правил, системам добровольной сертификации, условиям договоров, рецептур и других документов, определяемых заявителем. Система добровольной сертификации обычно вводится для повышения спроса на продукцию за счет информации о высоком качестве и безопасности продукции, обеспечения более высокого взаимного доверия поставщиков и потребителей, больших возможностей потребителей в выборе продукции.

Обязательная сертификация осуществляется органом по сертификации на основании договора с заявителем. Схемы сертификации, применяемые для сертификации определенных видов продукции, устанавливаются соответствующим техническим регламентом. Обязательной сертификации

подлежит большинство видов продукции и оборудования, как производимых в России, так и импортируемых из-за рубежа.

Соответствие продукции требованиям технических регламентов подтверждается сертификатом соответствия, выдаваемым заявителю органом по сертификации.

Сертификат соответствия – документ, удостоверяющий соответствие объекта требованиям технических регламентов, положениям стандартов, сводов правил или условиям договоров.

Для удостоверения соответствия различной продукции, работ или иных объектов техническим регламентам или стандартам, для помощи потребителя в выборе продукции или услуг, для повышения конкурентоспособности, а так же для обеспечения свободного перемещения товаров по территории Российской Федерации существует подтверждение соответствия.

Подтверждение соответствия – документальное удостоверение соответствия продукции или иных объектов, процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг требованиям технических регламентов, положениям стандартов, сводов правил или условиям договоров.

Подтверждение соответствия осуществляется на основе принципов:

- доступности информации о порядке осуществления подтверждения соответствия заинтересованным лицам;
- недопустимости применения обязательного подтверждения соответствия к объектам, в отношении которых не установлены требования технических регламентов;
- установления перечня форм и схем обязательного подтверждения соответствия в отношении определенных видов продукции в соответствующем техническом регламенте;
- уменьшения сроков осуществления обязательного подтверждения соответствия и затрат заявителя;
- недопустимости принуждения к осуществлению добровольного подтверждения соответствия, в том числе в определенной системе добровольной сертификации;
- защиты имущественных интересов заявителей, соблюдения коммерческой тайны в отношении сведений, полученных при осуществлении подтверждения соответствия;
- недопустимости подмены обязательного подтверждения соответствия добровольной сертификацией.

Подтверждение соответствия разрабатывается и применяется равным образом и в равной мере независимо от страны и места происхождения продукции.

Подтверждение соответствия на территории Российской Федерации может носить добровольный или обязательный характер. Добровольное подтверждение соответствия осуществляется в форме добровольной сертификации.

Обязательное подтверждение соответствия осуществляется в формах:

- принятия декларации о соответствии (далее – декларирование соответствия);
- обязательной сертификации.

Декларирование соответствия – форма подтверждения соответствия продукции требованиям технических регламентов.

Декларация о соответствии – документ, удостоверяющий соответствие выпускаемой в обращение продукции требованиям технических регламентов.

8.2. Органы сертификации

Орган по сертификации – юридическое лицо или индивидуальный предприниматель, аккредитованные в установленном порядке для выполнения работ по сертификации.

Орган по добровольной сертификации:

- осуществляет подтверждение соответствия объектов добровольного подтверждения соответствия;
- выдает сертификаты соответствия на объекты, прошедшие добровольную сертификацию;
- предоставляет заявителям право на применение знака соответствия, если применение знака соответствия предусмотрено соответствующей системой добровольной сертификации;
- приостанавливает или прекращает действие выданных им сертификатов соответствия.

Знак соответствия – обозначение, служащее для информирования приобретателей о соответствии объекта сертификации требованиям системы добровольной сертификации или национальному стандарту.

Обязательная сертификация осуществляется органом по сертификации, аккредитованным в порядке, установленном Правительством Российской Федерации.

Орган по обязательной сертификации:

- привлекает на договорной основе для проведения исследований или и измерений испытательные лаборатории, аккредитованные в порядке, установленном Правительством Российской Федерации;
- осуществляет контроль за объектами сертификации, если такой контроль предусмотрен соответствующей схемой обязательной сертификации и договором;
- ведет реестр выданных им сертификатов соответствия;

- информирует соответствующие органы государственного контроля за соблюдением требований технических регламентов о продукции, поступившей на сертификацию, но не прошедшей ее;
- выдает сертификаты соответствия, приостанавливает или прекращает действие выданных им сертификатов соответствия и информирует об этом федеральный орган исполнительной власти, организующий формирование и ведение единого реестра сертификатов соответствия, и органы государственного контроля за соблюдением требований технических регламентов;
- обеспечивает предоставление заявителям информации о порядке проведения обязательной сертификации;
- определяет стоимость работ по сертификации, выполняемых в соответствии с договором с заявителем в порядке, установленном соответствующим техническим регламентом, принимает решение о продлении срока действия сертификата соответствия, в том числе по результатам проведенного контроля за сертифицированными объектами.

8.3. Системы сертификации

Система сертификации – совокупность правил выполнения работ по сертификации, ее участников и правил функционирования системы сертификации в целом. На рис. 8.1. представлена обобщенная административная структура системы сертификации.

Система добровольной сертификации может быть создана юридическим лицом или индивидуальным предпринимателем или несколькими юридическими лицами или индивидуальными предпринимателями.

Лицо или лица, создавшие систему добровольной сертификации, устанавливают перечень объектов, подлежащих сертификации, и их характеристик, на соответствие которым осуществляется добровольная сертификация, правила выполнения предусмотренных данной системой добровольной сертификации работ и порядок их оплаты, определяют участников данной системы добровольной сертификации. Системой добровольной сертификации может предусматриваться применение знака соответствия.

Система добровольной сертификации может быть зарегистрирована федеральным органом исполнительной власти по техническому регулированию. Федеральный орган исполнительной власти по техническому регулированию ведет единый реестр зарегистрированных систем добровольной сертификации.

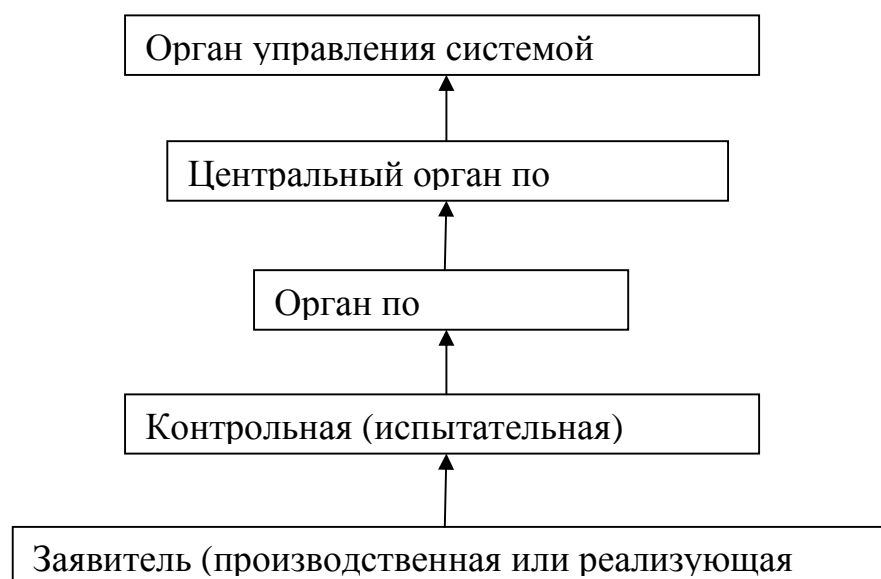


Рис. 8.1. Административная структура сертификации

Система обязательной сертификации установлена Правительством Российской Федерации, на её основе действует орган по обязательной сертификации.

8.4. Аккредитация испытательных лабораторий

Аккредитация – официальное признание органом по аккредитации компетентности физического или юридического лица выполнять работы в определенной области оценки соответствия.

Аккредитация органов по сертификации и испытательных лабораторий осуществляется в целях:

- подтверждения компетентности органов по сертификации и испытательных лабораторий, выполняющих работы по подтверждению соответствия;
- обеспечения доверия изготовителей, продавцов и приобретателей к деятельности органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий;
- создания условий для признания результатов деятельности органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий.

Аккредитация органов по сертификации и испытательных лабораторий, выполняющих работы по подтверждению соответствия, осуществляется на основе принципов:

- добровольности;
- открытости и доступности правил аккредитации;
- компетентности и независимости органов, осуществляющих аккредитацию;
- недопустимости ограничения конкуренции и создания препятствий пользованию услугами органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий;

- обеспечения равных условий лицам, претендующим на получение аккредитации;
- недопустимости совмещения полномочий на аккредитацию и подтверждение соответствия;
- недопустимости установления пределов действия документов об аккредитации на отдельных территориях.

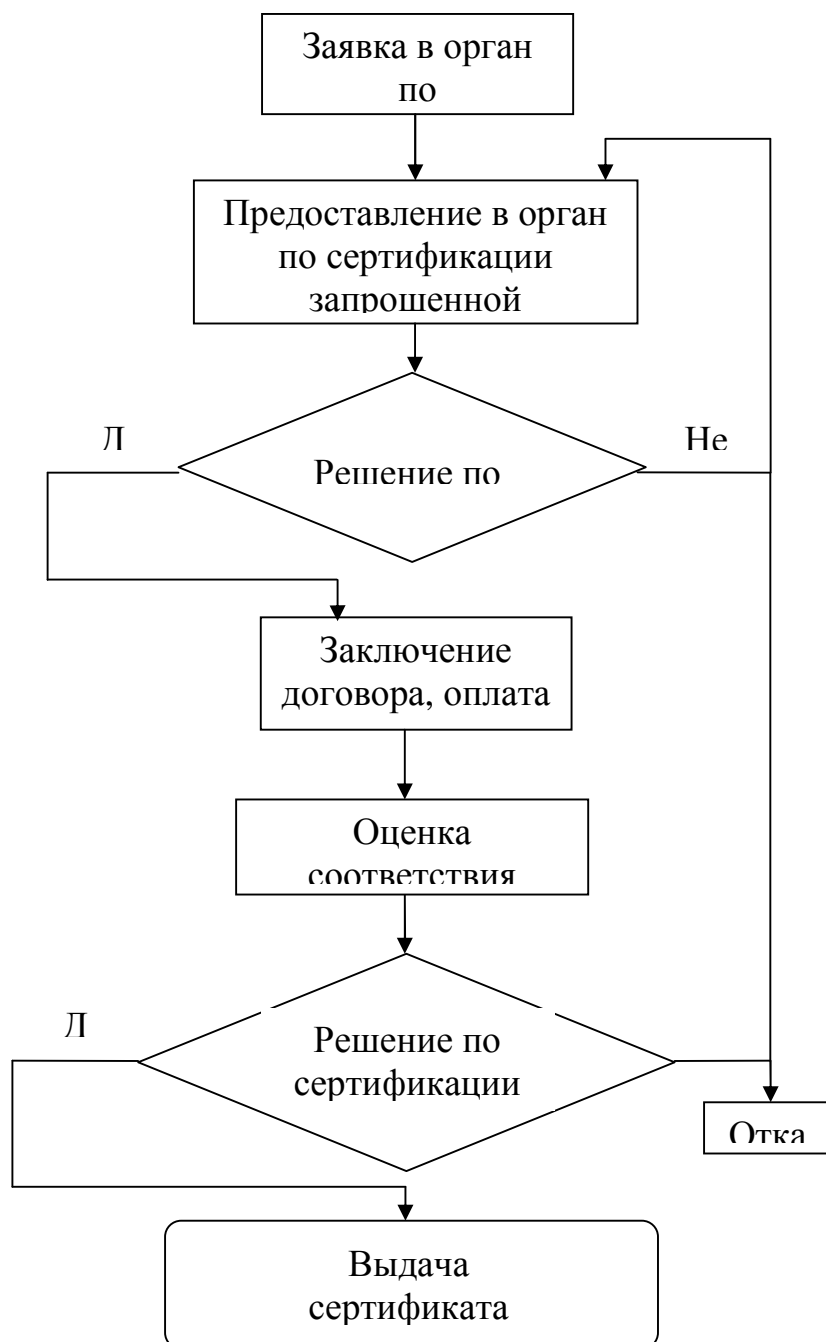


Рис. 8.2. Алгоритм сертификации продукции или услуг

Порядок аккредитации органов по сертификации и испытательных лабораторий, выполняющих работы по подтверждению соответствия, а

также перечень органов по аккредитации определяется Правительством Российской Федерации.

Аккредитованные испытательные лаборатории проводят исследования и измерения продукции в пределах своей области аккредитации на условиях договоров с органами по сертификации. Органы по сертификации не вправе предоставлять аккредитованным испытательным лабораториям сведения о заявителе.

Аккредитованная испытательная лаборатория оформляет результаты исследований и измерений соответствующими протоколами, на основании которых орган по сертификации принимает решение о выдаче или об отказе в выдаче сертификата соответствия. Аккредитованная испытательная лаборатория обязана обеспечить достоверность результатов исследований и измерений.

8.5. Основы квалиметрии

Квалиметрия – это наука об измерении и количественной оценке качества всевозможных предметов и процессов, т.е. объектов реального мира. Квалиметрия является частью качествоведения – комплексной науки о качестве, состоящей из квалитологии, т.е. общей теории качества, квалиметрии и учений об управлении качеством, в котором рассматриваются организационные, экономические и иные методы и средства влияния на качество объектов с целью повышения их способности удовлетворять существующие и будущие потребности людей.

Объектом квалиметрии может быть все, что представляет собой нечто цельное, что может быть вычленено для изучения, исследовано и познано.

Предметом квалиметрии является оценка качества в количественном его выражении.

Структура квалиметрии состоит из трех частей:

- *общая квалиметрия* или общая теория квалиметрии, в которой рассматриваются проблемы и вопросы, а также методы измерения и оценивания качеств;
- *специальные квалиметрии* больших группировок объектов, например, квалиметрии продукции, процессов, услуг, социального обеспечения, среды обитания и т.д. вплоть до качества жизни людей;
- *предметные квалиметрии* отдельных видов продукции, процессов и услуг, такие как квалиметрия машиностроительной продукции, строительных объектов, квалиметрия нефтепродуктов, труда, образования и т.д.

8.5.1. Качество продукции

Качество, в широком смысле этого понятия, объективная и наиболее обобщенная характеристика любого объекта.

Качество — это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Так же, качество является показателем, отражающим совокупное проявление многих факторов — от динамики и уровня развития национальной экономики до умения организовать и управлять процессом формирования качества в рамках любой хозяйственной единицы.

Качество продукции не ограничивается только одним свойством, это совокупность свойств. Качество продукции оценивается на основе количественного измерения определяющих ее свойств. Свойства продукции количественно выражаются в показателях качества (рис. 8.3).



Рис. 8.3. Показатели качества продукции

Общепризнанна классификация на десять групп свойств и соответственно показателей:

- *показатели назначения* характеризуют полезный эффект от использования продукции по назначению (производительность) и обуславливают область применения продукции;
- *показатели надежности* — безотказность, сохраняемость, ремонтпригодность, а также долговечность изделия;
- *показатели технологичности* характеризуют эффективность конструкторско-технологических решений для обеспечения высокой производительности труда при изготовлении и ремонте продукции;
- *показатели стандартизации и унификации* — это насыщенность продукции стандартными, унифицированными и оригинальными составными частями, а также уровень унификации по сравнению с другими изделиями;
- *эргономические показатели* отражают взаимодействие человека с изделием и комплекс гигиенических, антропометрических,

физиологических и психологических свойств человека, проявляющихся при использовании изделием;

- *эстетические показатели* характеризуют информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции, совершенство исполнения и стабильность товарного вида изделия;
- *показатели транспортабельности* выражают приспособленность продукции для транспортирования;
- *патентно-правовые показатели* характеризуют патентную защиту и патентную чистоту продукции и являются существенным фактором при определении конкурентоспособности;
- *показатели безопасности* характеризуют особенности продукции для безопасности покупателя и обслуживающего персонала, т.е. обеспечивают безопасность при монтаже, обслуживании, ремонте, хранении, транспортировании, потреблении продукции.

Существуют две группы методов оценки качества товаров: объективные методы определения показателей качества и эвристические методы.

8.5.2. Объективные методы определения показателей качества

Измерительный (лабораторный, инструментальный) метод определения численных значений показателей качества основан на информации, получаемой при использовании технических средств измерений (измерительных приборов, реактивов и др.).

Достоинствами измерительного метода являются его объективность и точность. К недостаткам этого метода следует отнести сложность и длительность некоторых измерений, необходимость специальной подготовки персонала, приобретение сложного, часто дорогостоящего оборудования, а в ряде случаев и необходимость разрушения образцов.



Рис. 8.4. Особенности измерительного контроля

При проведении инструментальной оценки и использовании полученных результатов следует учитывать, что результаты измерений дают приближенное значение измеряемой величины, т.е. могут содержать погрешности. Погрешности можно разделить на следующие группы:

- грубые (промахи);
- систематические;
- допустимые;
- случайные;
- ошибки выборки.

Регистрационный метод основан на наблюдении и подсчете числа определенных событий, случаев, предметов или затрат. Недостатком этого метода является его трудоемкость и в ряде случаев длительность проведения наблюдений.

Расчетный метод основан на получении информации расчетом. Показатели качества рассчитываются по математическим формулам, по параметрам, найденным другими методами, например измерительным.

Метод опытной эксплуатации является разновидностью регистрационного метода. Его используют, как правило, для определения показателей надежности, экологичности, безопасности. Метод опытной эксплуатации используют при оценке долговечности работы электрооборудования. Достоинством этого метода является высокая точность и достоверность значений показателей качества, а недостатками – продолжительность и большие затраты, а в некоторых случаях сложность моделирования условий эксплуатации.

8.5.3. Эвристические методы определения показателей качества

Органолептический метод основывается на использовании информации, получаемой в результате анализа ощущений и восприятий с помощью органов чувств человека – зрения, обоняния, слуха, осязания, вкуса. Разновидностью органолептического метода являются сенсорный, дегустационный и др. методы. Сенсорный анализ применяется для оценки качества продуктов питания. Дегустационный метод предполагает апробирование пищевых продуктов.

Социологический метод определения показателей качества основан на сборе и анализе мнений потребителей. Сбор мнений потребителей осуществляется различными способами: устный опрос; распространение анкет-вопросников, организация выставок-продаж, конференций, аукционов.

Статистические методы контроля и управления качеством основаны на определении значений показателей качества продукции с использованием методов теории вероятности и математической

статистики. Статистические методы применяются в системах качества, при сертификации продукции систем качества.

Экспертный метод – определения показателей качества основан на учете мнений специалистов-экспертов.

8.5.3.1. Экспертный метод оценки качества продукции

Эксперт – это специалист, компетентный в решении конкретной задачи. Этот метод применяют в тех случаях, когда показатели качества не могут быть определены другими методами из-за недостаточного количества информации, необходимости разработки специальных технических средств и т.п.

Экспертный метод является совокупностью нескольких различных методов, которые представляют собой его модификации. Известные разновидности экспертного метода применяются там, где основой решения является коллективное решение компетентных людей (экспертов). Квалификация эксперта определяется не только знанием предмета обсуждения. Учитываются специфические возможности эксперта. Например, в пищевой промышленности при оценке качества продуктов питания учитывают возможности эксперта воспринимать вкус, запах, а также его состояние здоровья. Эксперты, оценивающие эстетические и эргономические показатели качества, должны быть хорошо осведомлены в области художественного конструирования.

При использовании экспертного метода для оценки качества формируют рабочую и экспертную группы. Рабочая группа организует процедуру опроса экспертов, собирает анкеты, обрабатывает и анализирует экспертные оценки.

Экспертная группа формируется из высококвалифицированных специалистов в области создания и использования оцениваемой продукции: товароведы, маркетологи, дизайнеры, конструкторы, технологи и др. Желательно, чтобы экспертная группа формировалась не для одной экспертизы, а как постоянно функционирующий орган с достаточно стабильным составом экспертов.

8.6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение термину «сертификации».
2. Назовите цели сертификации.
3. Может ли СИ быть объектом сертификации?
4. Является ли добровольная сертификация составной частью обязательной?
5. Как называется документ, удостоверяющий соответствие объекта требованиям технических регламентов, стандартов?
6. Верно ли утверждение: «сертификация на территории РФ является только обязательной»?

7. Приведите определение органа сертификации.
8. Что такое знак соответствия?
9. Как называется совокупность правил выполнения работ по сертификации, ее участников и правил функционирования системы сертификации в целом?
10. Что вы понимаете под аккредитацией?
11. Какая наука занимается измерением и количественной оценки качества всевозможных предметов и процессов?
12. Из каких частей состоит квалиметрия?
13. Дайте определение качеству.
14. Что отражают эргономические показатели качества?
15. Какие показатели качества определяет надежность?
16. Назовите 4 объективных метода определения качества.
17. В какую группу методов определения качества входит экспертный метод?
18. Назовите метод определения качества, основанный на получении информации расчетом.
19. Дайте определение эксперта.
20. На чем основан социологический метод определения качества?

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.

Попадая на производство, специалист, будучи прямо или косвенно связан по работе с измерениями, сталкивается с обилием измерительных задач, нормативных документов общетехнического и метрологического содержания, исполнение которых обязательно (стандарты, методические указания, инструкции). Облегчить ему изучение методов и средств измерений и выполнение требований этих документов должно изучение дисциплины «Метрология, стандартизация и сертификация».

Разумеется, в рамках отдельной дисциплины невозможно охватить все многообразие физических величин, измерительных задач и приборов, с которыми может встретиться специалист в своей производственной деятельности.

Методы и средства измерения ряда специфических для конкретных специальностей и специализаций физических величин изучаются в специальных дисциплинах на последующих этапах обучения и требуют для осознанного восприятия не только углубленной подготовки по специальности, но и соответствующей метрологической подготовки.

Материал учебного пособия «Основы метрологии, стандартизации и сертификации» включает в себя восемь взаимосвязанных разделов, которые обеспечивают в совокупности необходимый уровень подготовки по метрологии, стандартизации и сертификации специалистов по направлениям подготовки 200101 ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, 220401 МЕХАТРОНИК, 230100 ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, а также бакалавров и магистров по направлению 200100 ПРИБОРОСТРОЕНИЕ.

Авторы надеются, что материал учебного пособия станет фундаментом, на основе которого студент получит, и будет непрерывно совершенствовать знания в области метрологии, стандартизации и сертификации.

**СПИСОК ОСНОВНЫХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ
СТАНДАРТОВ И НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ
В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ**

Государственные стандарты

1. ГОСТ 8.009–84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
2. ГОСТ 8.016–81 ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения плоского угла.
3. ГОСТ 8.019–85 ГСИ. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений тангенса угла потерь.
4. ГОСТ 8.021–84 ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная первичная схема для средств измерения массы.
5. ГОСТ 8.022–91 ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений силы постоянного электрического тока в диапазоне 10–16–30 А.
6. ГОСТ 8.023–90 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений световых величин непрерывного и импульсного излучения.
7. ГОСТ 8.027–89 ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений электродвижущей силы и постоянного напряжения.
8. ГОСТ 8.028–86 ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений электрического сопротивления.
9. ГОСТ 8.029–80 ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений индуктивности.
10. ГОСТ 8.050–73 ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений.
11. ГОСТ 8.057–80 ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения.
12. ГОСТ 8.061–80 ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение.
13. ГОСТ 8.065–85 ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений силы.
14. ГОСТ 8.109–83 ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний.

15. ГОСТ 8.129–99 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты.
16. ГОСТ 8.132–74 ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений силы тока 0,04-300 А в диапазоне частот 0,1-300 МГц,
17. ГОСТ 8.144–75 ГСИ. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции в диапазоне 0,05-2 Тл.
18. ГОСТ 8.157–75 ГСИ. Шкалы температурные практические,
19. ГОСТ 8.188–85 ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции в диапазоне 0,1-10 Тл.
20. ГОСТ 8.207–76 ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.
21. ГОСТ 8,256–77 ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерения. Основные положения,
22. ГОСТ 8,268–77 ГСИ. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик магнитотвердых материалов.
23. ГОСТ 8.310–90 ГСИ. Государственная служба стандартных справочных данных. Основные положения.
24. ГОСТ 8.315–97 ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения.
25. ГОСТ 8.371–80 ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений электрической емкости.
26. ГОСТ 8.372–80 ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Порядок разработки, утверждения, регистрации, хранения и применения.
27. ГОСТ 8,377–80 ГСИ. Материалы магнитомягкие. Методики выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик.
28. ГОСТ 8.381–80 ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей.
29. ГОСТ 8.395–80 ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования.
30. ГОСТ 8.401–80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.
31. ГОСТ 8.417–81 ГСИ. Единицы физических величин.
32. ГОСТ 8.498–83 ГСИ. Государственный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений электрической добротности.

33. ГОСТ 8.508–84 ГСИ. Метрологические характеристики средств измерений и точностные характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля.
34. ГОСТ 8.525–85 ГСИ. Установки высшей точности для воспроизведения единиц физических величин. Порядок разработки, аттестации, регистрации, хранения и применения.
35. ГОСТ 8.532–85 ГСИ. Стандартные образцы состава веществ и материалов. Порядок межлабораторной аттестации.
36. ГОСТ 8.558–93 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерения температуры.
37. ГОСТ 1954–82. Меры электродвижущей силы. Элементы нормальные. Общие технические условия.
38. ГОСТ 2575–88. Меры плоского угла призматические. Общие технические условия.
39. ГОСТ 9038–90. Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия.
40. ГОСТ 11113–82. Генераторы импульсов измерительные. Общие технические требования и методы испытаний.
41. ГОСТ 12635–67. Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 10 Гц до 1 НГц.
42. ГОСТ 12636–67. Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 1 до 200 МГц.
43. ГОСТ 12637–67. Материалы магнитомягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 200 до 2000 МГц.
44. ГОСТ 12997–84. Изделия ГСП. Общие технические условия.
45. ГОСТ 13033–84 ГСП. Приборы и средства автоматизации электрические аналоговые. Общие технические условия.
46. ГОСТ 14014–91. Приборы и преобразователи измерительные цифровые напряжения, тока, сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний.
47. ГОСТ 16263–70 ГСИ. Метрология. Термины и определения (отменен с 01.01.2001).
48. ГОСТ 16465–70. Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения.
49. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытание и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
50. ГОСТ 18242–72. Статистический приемочный контроль по альтернативному признаку. Планы контроля.
51. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
52. ГОСТ 20504–81. Система унифицированных типовых конструкций агрегатных комплексов ГСП. Типы и основные размеры.

53. ГОСТ 20906–75. Средства измерений магнитных величин. Термины и определения.
54. ГОСТ 22261–94. Средства измерения электрических и магнитных величин. Общие технические условия.
55. ГОСТ 23217–78. Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения.
56. ГОСТ 24026–80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения.
57. ГОСТ 24289–80. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения.
58. ГОСТ 24450–80. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения.
59. ГОСТ 24555–81. Система государственных испытаний продукции. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения.
60. ГОСТ 24855–81. Преобразователи измерительные тока, напряжения мощности, частоты, сопротивления аналоговые. Общие технические условия.
61. ГОСТ Р 22.2.04–94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные аварии и катастрофы. Метрологическое обеспечение контроля состояния сложных технических систем. Основные положения и правила.
62. ГОСТ Р 8.561–96 ГСИ. Метрологическое обеспечение банковских технологий.
63. ГОСТ Р 8.563–96 ГСИ. Методики выполнения измерений.
64. ГОСТ Р 8.565–96 ГСИ. Метрологическое обеспечение эксплуатации атомных станций. Основные положения.
65. ГОСТ Р 8.568–97 ГСИ. Аттестация испытательного оборудования.
66. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025–2000. Общие требования к компетенции испытательных и калибровочных лабораторий.

Рекомендации по метрологии

67. МИ 81–76. Методика планирования наблюдений и оценки показателей надежности.
68. МИ 83–76. Методика определения параметров поверочных схем.
69. МИ 187–86. Методика. Критерии качества поверки средств измерений.
70. МИ 188–86. Методика установления допускаемой погрешности поверки средств измерений.
71. МИ 222–80. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем по метрологическим характеристикам компонентов.

72. МИ 641–84. Расчет значений критериев качества поверки средств измерений методами программного моделирования.
73. МИ 1202–86 ГСП. Приборы и преобразователи измерительные напряжения, тока и сопротивления цифровые. Общие требования к методике поверки.
74. МИ 1314–86 ГСИ, Порядок проведения метрологической экспертизы технических заданий на разработку средств измерений.
75. МИ 1317–86. Результаты и характеристики погрешностей измерений. Форма представления. Способы использования при испытании образцов продукции и контроля их параметров.
76. МИ 1552–86 ГСИ. Измерения прямые однократные, Оценивание погрешностей результатов измерений.
77. МИ 1604–87 ГСИ. Меры длины концевые плоскопараллельные. Общие требования к методикам поверки.
78. МИ 1872–88 ГСИ. Межповерочные интервалы образцовых средств измерений. Методика определения и корректировки.
79. МИ 1888–88 ГСИ. Нормальные условия измерений в гибких производственных системах.
80. МИ 1935–88 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений электрического напряжения до 1000 В в диапазоне частот $1 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^9$ Гц.
81. МИ 1949–88 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений угла фазового сдвига между двумя электрическими напряжениями в диапазоне частот $1 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^7$ Гц.
82. МИ 1951–89 ГСИ. Динамические измерения. Термины и определения.
83. МИ 1967–89 ГСИ. Выбор методов и средств измерений при разработке методик выполнения измерений. Общие положения.
84. МИ 2005–89 ГСИ. Порядок проведения работ по взаимному признанию государственных испытаний и поверки средств измерений.
85. МИ 2060–90 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерения длины в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} \text{ К}50$ м и длин волн в диапазоне 0,2... 50 мкм.
86. МИ 2083–90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.
87. МИ 2090–99 ГСИ. Определение динамических характеристик линейных аналоговых средств измерений с сосредоточенными параметрами. Общие положения.
88. МИ 2091–90 ГСИ. Измерения физических величин. Общие требования.

89. МИ 2097–90 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений электрической емкости в диапазоне частот 1 – 100 МГц.
90. МИ 2146–98 ГСИ. Порядок разработки и требования к содержанию программ испытаний средств измерений для целей утверждения их типа.
91. МИ 2168–91 ГСИ. ИИС. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов по метрологическим характеристикам линейных аналоговых компонентов.
92. МИ 2174–91 ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения.
93. МИ 2175–91 ГСИ. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения, оценивание погрешностей.
94. МИ 2177–91. Измерения и измерительный контроль. Сведения о погрешностях измерений в конструкторской и технической документации.
95. МИ 2187–92 ГСИ. Межповерочные и межкалибровочные интервалы средств измерений. Методика определения.
96. МИ 2230–92 ГСИ. Методика количественного обоснования поверочных схем при их разработке.
97. МИ 2232–2000 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Оценивание погрешности измерений при ограниченной исходной информации.
98. МИ 2233–2000 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Основные положения.
99. МИ 2240–98 ГСИ. Анализ состояния измерений, контроля и испытаний на предприятии, в организации, объединении. Методика и порядок проведения работы.
100. МИ 2246–93 ГСИ. Погрешности измерений. Обозначения.
101. МИ 2258–93 ГСИ. Стандартные образцы. Оценивание метрологических характеристик с использованием эталонов и образцовых средств измерений.
102. МИ 2266–2000 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Создание и использование баз данных о метрологических характеристиках средств измерений.
103. МИ 2267–2000 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации.
104. МИ 2284–94 ГСИ. Документация поверочных лабораторий.
105. МИ 2301–2000 ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений

106. МИ 2307–94 ГСИ. Программа и методика ускоренных испытаний с целью подтверждения межповерочных интервалов.
107. МИ 2322–99 ГСИ. Типовые нормы времени на поверку средств измерений
108. МИ 2365–96 ГСИ. Шкалы измерений. Основные положения. Термины и определения.
109. МИ 2377–98 ГСИ. Разработка и аттестация методик выполнения измерений.
110. МИ 2378–96 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитных потерь в магнито-мягких материалах в диапазоне частот от 50 до $2 \cdot 10^5$ Гц.
111. МИ 2455–98 ГСИ. Основные требования к метрологическому обеспечению при предоставлении услуг по техническому обслуживанию и ремонту автотранспортных средств (АМТС).
112. МИ 2492–98 ГСИ. Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на техническую компетентность в осуществлении метрологического надзора.
113. МИ 2500–98 ГСИ. Основные положения метрологического обеспечения на малых предприятиях.

Руководящие документы

114. РД 50–160–9. Внедрение и применение ГОСТ 8.417–81 «ГСИ. Единицы физических величин».
115. РД 50–453–84. Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета.
116. РД 50–660–88 ГСИ. Документы на методики средств измерений.

Правила по метрологии

117. ПР 50–732–93 ГСИ. Типовое положение о метрологической службе государственных органов управления РФ и юридических лиц.
118. ПР 50.2.002–94 ГСИ. Порядок осуществления государственного метрологического надзора за выпуском, состоянием и применением средств измерений, аттестованных методиками выполнения измерений, эталонами и соблюдением метрологических правил и норм.
119. ПР 50.2.003–94 ГСИ. Порядок осуществления государственного метрологического контроля за количеством товаров, отчуждаемых при совершении торговых операций.
120. ПР 50.2.004–94 ГСИ. Порядок осуществления государственного метрологического контроля за количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при их расфасовке и продаже.

121. ПР 50.2.005–94 ГСИ. Порядок лицензирования деятельности по изготовлению, ремонту, продаже и прокату средств измерений.
122. ПР 50.2.006–94 ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения.
123. ПР 50.2.007–94 ГСП. Поверительные клейма.
124. ПР 50.2.008–94 ГСИ. Порядок аккредитации головных и базовых организаций метрологической службы государственных органов управления Российской Федерации и объединений юридических лиц.
125. ПР 50.2.009–94 ГСИ. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средства измерений.
126. ПР 50.2.010–94 ГСИ. Требования к государственным центрам испытаний средств измерений и порядок их аккредитации.
127. ПР 50.2.011–94 ГСИ. Порядок ведения Государственного реестра средств измерений.
128. ПР 50.2.012–94 ГСИ. Порядок аттестации поверителей средств измерений.
129. ПР 50.2.013–97 ГСИ. Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право аттестации методик выполнения измерений и проведения метрологической экспертизы документов.
130. ПР 50.2.014–94 ГСИ. Аккредитация метрологических служб юридических лиц на право поверки средств измерений.
131. ПР 50.2.016–94 ГСИ. Российская система калибровки. Требования к выполнению калибровочных работ.
132. ПР 50.2.017–94 ГСИ, Положение о Российской системе калибровки.
133. ПР 50.2.018–95 ГСИ. Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право проведения калибровочных работ.
134. ПР 50.2.020–96 ГСИ. Порядок ведения Государственного реестра утвержденных типов стандартных образцов.
135. ПР РСК 001–95 ГСИ. Порядок регистрации государственных научных метрологических центров и органов Государственной метрологической службы в качестве аккредитирующих органов в Российской системе калибровки.
136. ПР РСК 002–95 ГСИ. Калибровочные клейма.
137. ПР РСК 003-98. Порядок осуществления инспекционного контроля за соблюдением аккредитованными метрологическими службами требований к проведению калибровочных работ
138. Р РСК 001–95. Типовое положение о калибровочной лаборатории.
139. РМГ 29–99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации ГСИ. Метрология. Основные термины и определения (взамен ГОСТ 16263-70).

Более детальную информацию о нормативных документах в области метрологии можно найти в [19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии: Учеб. Пособие. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 312 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. – 576 с.
3. Государственные эталоны России: Каталог – М. Госстандарт России, 2000.
4. Грановский В.А. Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения. Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 314 с.
5. ГОСТ Р 1.12-2004. Стандартизация. Термины и определения. – М. Изд-во стандартов, 2005. – 28с.
6. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация, сертификация. 2-е изд. – Спб.: Питер, 2003 – 432 с.
7. Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 285с.
8. Иванов В.А., Марусина М.Я., Ткалич В.Л. Первичные преобразователи информации: Учебное пособие. – Спб.: СПбГИТМО(ТУ), 2002. – 103 с.
9. Иванов В.А., Марусина М.Я., Ткалич В.Л. Прикладная метрология: Учебное пособие. – Спб.: СПбГИТМО(ТУ), 2003. – 104 с.
- 10.Коротков В.П., Тайц Б.А. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 352 с.
- 11.Ким К.К. Метрология, стандартизация, сертификация. – С-Пб.: Питер, 2006. – 367 с.
- 12.Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831 с.
- 13.Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии. – М.: Издательство Юнити-Дана, 1999. – 711 с.
- 14.Кузнецов В.А., Ялунина Г.В. Основы метрологии. М.: Изд-во стандартов, 1995. – 230 с.
- 15.Маркин Н.С. Практикум по метрологии: Учеб. пособие. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 186 с.
- 16.Марусина М.Я. Инвариантный анализ и синтез в моделях с симметриями. – Спб.: СПбГУ ИТМО, 2004. – 144 с.
- 17.Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 245 с.
- 18.Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С. Динамика погрешностей средств измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 187 с.

19. Нормативные документы в области метрологии (действующие в России по состоянию на 1 января 1998 г.) Указатель. Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС). М.: ТОО «ТОТ», 1998.
20. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений // Нормативно-технические документы (ГОСТ 8.009–84, методический материал по применению ГОСТ 8.009–84, РД 50–453–84). М.: Изд-во стандартов, 1988.
21. Основные термины в области метрологии. Словарь-справочник / Под ред. Ю.В. Тарбеева. М.: Изд-во стандартов, 1989.
22. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. – 196 с.
23. Рейх Н.Н., Тупиченков А.А., Цейтлин В.Г. Метрологическое обеспечение производства / Под ред. Л.К. Исаева. М.: Изд-во стандартов, 1987. – 308 с.
24. РМГ 29–99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации ГСИ. «ГСП. Метрология. Основные термины и определения (взамен ГОСТ 16263–70)» – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 45 с.
25. Российская метрологическая энциклопедия. Гл. редактор Тарбеев Ю.В. – СПб.: Лики России, 2001. – 849 с.
26. Руководство по выражению неопределенности измерения. Первая редакция Международная организация по стандартизации. 1993 г., Перевод и публикация ГП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Научный редактор проф. Слаев В.А. – СПб.: 1999. – 134 с.
27. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. Карманная энциклопедия студента: Учебное пособие для студентов высших и средних специальных учебных заведений. – М.: Логос, 2001. – 376 с.
28. Сергеев А.Г., Латышев М.В. Сертификация. – М.: Изд-во «Логос», 2000. – 248 с.
29. Гартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.
30. Федюкин В.К. Основы квалиметрии. – М.: Изд-во «ФИЛИНЪ», 2004. – 296 с.
31. Шабалин С.А. Прикладная метрология в вопросах и ответах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 192 с.
32. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. М.: Изд-во стандартов, 1990. – 492 с.
33. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Ч.1. Общая теория измерений: учеб.-мет. комплекс (учеб. пособие), 3-е изд., перераб. и доп., / И.Ф. Шишкин. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. – 189 с.

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии, в прошлом кафедра часового производства и приборов точной механики, была создана одновременно с основанием университета, который ведёт свою историю от образования в 1900 г. ремесленного училища цесаревича Николая. Основателем кафедры является Норберт Болеславович Завадский – первый заведующий механико-оптического отделения этого училища.

В 1920 г. после революции механико-оптическое отделение было реорганизовано в техникум точной механики и оптики, который с 1925 г. начал подготовку инженеров-приборостроителей. В дальнейшем техникум был преобразован и уже в 1933 г. стал институтом точной механики и оптики. В течение этого времени кафедрой заведовал профессор Н.Б. Завадский.

В 1930 кафедра получила название Приборов точной механики и ее возглавил Лаврентий Павлович Шишелов. В этот период времени на кафедре читались дисциплины «Теория часовых механизмов», «Электроизмерительные приборы» и «Механические приборы». В 1935 г. из состава кафедры выделилось направление гироскопических устройств и навигационных приборов. В 1940 г. на кафедре защитил кандидатскую диссертацию Захар Маркович Аксельрод, впоследствии доктор технических наук, возглавлявший кафедру во время войны.

После войны кафедра приборов точной механики выпускала специалистов по часовому производству и производству точного мерительного инструмента. На кафедре читались курсы «Приборы вре-

мени», «Теория и проектирование приборов времени», «Приборы для измерения малых промежутков времени», «Приборы для измерения скоростей и ускорений», «Тахометры», «Основы конструирования приборов точной механики».

В 1976 г. кафедру возглавил профессор Борис Александрович Арефьев, известный специалист в области автоматического управления и газовых опор. В это время на кафедре производилась подготовка специалистов по специальности «Приборы точной механики» со специализациями «Приборы времени», «Приборы для измерения длин и углов» и «Приборы контроля размеров».

С 1985 года кафедрой заведовал основатель магниторезонансного класса изображений профессор Владислав Александрович Иванов. В связи с развитием техники и потребностью в выпуске инженерных кадров по разработке и эксплуатации магнитно-резонансных томографов с 1992 года кафедра начала подготовку инженеров по специализации «Компьютерная томография» и была переименована в кафедру Измерительных технологий и компьютерной томографии.

С 2005 г. кафедру возглавляет доктор технических наук, профессор Мария Яковлевна Марусина, являющаяся председателем УМК по специальности 200101 «Приборостроение» УМО ВУЗов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники. На кафедре ведутся научно-исследовательские работы по следующим направлениям: теоретико-групповые методы анализа и синтеза информационно-измерительных систем, метрологическое обеспечение нанотехнологий, микромеханические приборы и системы, томографические методы диагностики объектов (МРТ, КТ, ПЭТ), разработка и создание ЯМР-томографа. Научно-исследовательская работа кафедры получила финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (сотрудниками кафедры выиграно четыре конкурсные заявки на гранты РФФИ). В 2005 г. кафедра заняла III место по итогам конкурса ведущих научно-педагогических коллективов СПбГУ ИТМО.

В настоящее время кафедра проводит подготовку инженеров по направлениям:

- 2-х уровневая инженерная подготовка (бакалавр – 4 года и магистр – 2 года) **по направлению 200100** «Приборостроение» по профилю «Приборостроение» со специализациями: «Приборостроение» (бакалавр), «Информационно-измерительные комплексы» (магистр), «Томографические методы диагностики» (магистр);
- специалист (5 лет) **по специальности 200101** «Приборостроение» со специализациями: «Компьютерная томография», «Методы и средства измерения механических величин».

Кафедра имеет персональную страничку в Интернете: <http://faculty.ifmo.ru/tomograph>.

Мария Яковлевна Марусина
Вера Леонидовна Ткалич
Евгений Александрович Воронцов
Наталья Дмитриевна Скалецкая

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ
СТАНДАРТИЗАЦИИ И СЕРТИФИКАЦИИ

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий, механики и оптики

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати 23.12.08

Отпечатано на ризографе

Тираж 100 экз.

Заказ № 1634