

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

И.А. ДОКУКИНА, Е.К. САВИЧ, Д.В. АНТИПОВ

МЕТРОЛОГИЯ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.04 Авиастроение, 27.03.02 Управление качеством и специальности 24.05.07 Самолёто- и вертолётостроение,

САМАРА

Издательство Самарского университета

2023

УДК 006.91(075)
ББК Ж10я7
Д638

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Я.А. Ерисов,
д-р экон. наук, проф. М.О. Искосков

Докукина, Ирина Александровна

Д638 Метрология: учебное пособие / *И.А. Докукина, Е.К. Савич, Д.В. Антипов.* – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. – 76 с.

ISBN 978-5-7883-1925-4

Рассмотрены основные вопросы обеспечения единства измерений, проведения измерений с требуемой точностью и расчета погрешности при проведении измерений.

Предназначено для обучающихся по направлениям подготовки 24.03.04 Авиастроение, 27.03.02 Управление качеством и специальности 24.05.07 Самолёто- и вертолётостроение,

Может быть также использовано для обучения по направлениям подготовки 23.03.01 Технология транспортных процессов, 25.03.01 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей, 24.03.01 Ракетные комплексы и космонавтика, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств и специальности 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов.

УДК 006.91(075)
ББК Ж10я7

ISBN 978-5-7883-1925-4

© Самарский университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МЕТРОЛОГИИ	6
1.1. Основные этапы развития метрологии.....	6
1.2. Основные понятия и определения	7
1.3. Виды измерений	9
1.4. Шкалы свойств физических величин, типы шкал.....	15
2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ	17
2.1. Виды средств измерения	17
2.2. Метрологические характеристики средств измерений.....	19
2.3. Погрешности средств измерения.....	22
2.4. Метрологическая надежность средств измерения	23
3. ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ	29
3.1. Факторы, влияющие на процесс измерения	29
3.2. Погрешности при проведении измерений	32
4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	35
4.1. Основной постулат метрологии.....	35
4.2. Однократное измерение.....	40
4.3. Обработка результатов многократных измерений.....	41
4.4. Определение доверительных границ систематической погрешности измерений	43
4.5. Определение границ суммарной погрешности измерения..	44
4.6. Повышение качества измерений.....	45
4.7. Обработка результатов нескольких серий измерений.....	47
5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ	50
5.1. Единство измерения.....	50
5.2. Поверочные схемы	52
5.3. Поверка средств измерения.....	57

5.4. Калибровка средств измерения.....	61
5.5. Нестандартные средства измерений.....	63
6. ГОСУДАРСТВЕННАЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА РФ	66
6.1 Состав и основные задачи Государственной метрологической службы	66
6.2.Государственный метрологический контроль и надзор.....	70
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	73

ВВЕДЕНИЕ

С течением мировой истории человеку приходилось измерять различные вещи, взвешивать продукты, отсчитывать время. Для этой цели понадобилось создать целую систему различных измерений, необходимую для вычисления длины, объема, веса, времени и т.п. Данные подобных измерений помогали освоить количественную характеристику окружающего мира. Так зарождалась наука, называемая метрологией.

Она служит не только основой научно-технических знаний, но и имеет первостепенное значение для учета материальных ресурсов, планирования, для обеспечения качества продукции, совершенствования технологий, обеспечения безопасности человеческой деятельности.

Метрология имеет большое значение для прогресса естественных и технических наук, так как повышение точности измерений – одно из средств совершенствования путей познания природы человеком, открытий и практического применения точных знаний.

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

Цель учебного пособия – ознакомить обучающихся с различными видами средств измерений, методами поведения измерений, овладеть навыками выбора средств измерения, расчета погрешности, а также развитие представления об основных принципах обеспечения измерения в нашей стране.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В МЕТРОЛОГИИ

1.1. Основные этапы развития метрологии

Слово «метрология» означает учение о мерах. В современном понимании метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Измерения – один из самых древних видов человеческой деятельности, имеющий многовековую историю и развивающийся одновременно с человеческим обществом, как язык общения и необходимое условие экономических связей в торгово-промышленной практике и в быту.

Первые измерения заключались в сопоставлении наблюдаемых человеком предметов с размерами собственного тела и его частей. Основой использования таких мер являлась древняя философия, древнегреческий философ Протагор утверждал, что «Человек есть мера всех вещей». В результате возникли такие единицы измерения как: дюйм (равный ширине большого пальца), фут (равный длине ступни ноги), аршин (локоть в переводе с персидского) и др. Достоинствами этих мер являлись их наглядность и наличие «под рукой».

Для осуществления более тесных контактов с зарубежными странами метрология формируется уже как наука. Проводятся научные исследования с целью повышения точности измерений и поисков естественных эталонов единиц. Появляются шкалы. Вводятся акты законодательной метрологии. В 1736 году по решению Сената в России была образована Комиссия весов и мер.

В качестве исходных мер Комиссия изготовила медный аршин и деревянную сажень (2,13 м), за меру веществ было принято ведро московского Каменноостовского Литейного двора.

В дальнейшем с целью унификации единиц физических величин во Франции была разработана метрическая система мер, которая с 1837 г. вводится во Франции законодательно, а в последующие

30 лет распространяется по всей Европе. Основой этой системы является метр, равный одной десятиллионной части четверти меридиана, проходящего через Париж.

В 1842 году в России организуется первый центр метрологии – Депо образцовых мер и весов, а после подписания метрической конвенции в 1875 году Россия получила платиноиридиевые эталоны единицы массы (№ 12 и № 26) и эталоны единицы длины – метра (№ 11 и № 28).

8 июня 1893 году Депо преобразуется в Главную палату мер и весов, а Менделеев становится ее первым управляющим. Главной заслугой Д.И. Менделеева в области метрологии считается установление приемов метрологического (образцового) точного взвешивания.

Законодательно метрологическая система в России была введена в 1918 году декретом Совета Народных Комиссаров «О введении Международной метрической системы мер и весов». В 1921 году Ленин подписал Постановление о Всероссийской поверке мер и весов. В 1922 году в Главной палате были организованы два института: метрологический и поверочный.

В 1924 году было принято постановление, по которому Главная палата становится государственным учреждением, действующим на всей территории СССР. 15 сентября 1925 года СНК СССР утвердил положение о вновь созданном Комитете по стандартизации и метрологии.

В 1960 году XI Международная конференция по мерам и весам приняла Международную систему единиц физических величин – систему СИ, которая узаконена теперь более чем в 124 странах мира.

1.2. Основные понятия и определения

Измерением называется нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических

средств. Они предназначены для получения информации и используются в управлении качеством.

Точность измерения характеризуется близостью результата к истинному значению измеряемой величины.

Физическая величина – свойство, общее в качественном отношении для многих объектов, но в количественном – индивидуально для каждого.

Количественное содержание – размер физической величины, а числовую оценку размера называют значением физической величины.

Физические величины, выражающие одно и то же свойство, называют однородными. Они выражены в одинаковых единицах, и их можно сравнивать.

Единица физической величины – величина, которой по определению присвоено значение «1».

Истинным называется значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношении соответствующие свойства объекта. Результат измерений дает только оценку истинного значения с некоторой погрешностью.

Действительное значение физической величины – значение, найденное экспериментальным путем и настолько приближенное к истинному значению, что для данных целей может быть использовано вместо него.

Измерение некоторой физической величины производят путем сравнения в ходе эксперимента измеряемого образца с мерой, принятой за единицу.

Физические величины классифицируются по ряду признаков. Различают несколько классификаций физических величин.

1 – По условной зависимости от других величин физические величины делятся на основные (метр, килограмм, секунда и др. В СИ всего семь основных единиц физических величин) и производные

(получают как производные основных единиц физических величин).

2 – По отношению к сигналам измерительной информации физические величины разделяются на активные и пассивные.

Активными называются величины, которые без использования дополнительных источников энергии могут преобразовываться в сигнал измерительной информации (сила тока, электрическое напряжение, сила).

Для измерения пассивных величин необходимо использовать дополнительные источники энергии (электрическое сопротивление, индуктивность). Существуют очень точные меры пассивных величин, но непосредственное сравнение с ней пассивных величин невозможно.

3 – По признаку аддитивности физические величины разделяют на аддитивные и неаддитивные

Аддитивными обычно являются физические или энергетические свойства объекта. К ним применимы операции суммирования или вычитания (длина, масса).

Неаддитивные величины непосредственно не измеряются, а преобразуются в непосредственно измеряемые величины (удельная электрическая проводимость, вязкость).

Физические величины, характеризующие свойства веществ и материал, лучше всего воспроизводятся с помощью стандартных образцов. Стандартный образец – это средство измерений в виде вещества (материала), состав или свойство которого установлены при аттестации.

1.3. Виды измерений

Измерение – познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента данной величины с известной величиной, принятой за единицу сравнения. Это нахождение

физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств [1].

Измерения классифицируют по:

- общим приемам получения результатов измерений – прямые, косвенные, совместные, совокупные;
- выражению результата измерений – абсолютные, относительные;
- числу измерений в серии – однократные, многократные;
- отношению к изменению измеряемой величины – статические, динамические;
- характеристике точности – равноточные, неравноточные;
- метрологическому назначению – технические, метрологические.

Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Например, измерение температуры воздуха термометром, силы тока – амперметром, диаметра вала – микрометром и т.п.

Косвенное измерение – это измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. При этом числовое значение искомой величины определяется по формуле

$$z = f(a_1, a_2, \dots, a_m),$$

где z – значение искомой величины; a_1, a_2, \dots, a_m – значение непосредственно измеряемых величин.

Косвенные измерения сложнее прямых, однако они широко применяются на практике в случаях, когда прямые измерения практически невыполнимы или когда косвенное измерение позволяет получить более точный результат по сравнению с прямым измерением.

Например, вычислим длины окружности L на основании прямого измерения диаметра d по формуле $L = \pi \cdot d$.

Совместные измерения – это производимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для нахождения зависимости между ними.

Например, на основании одновременных измерений приращений Δl длины детали в зависимости от изменений Δt его температуры (не одноименных величин) определяют коэффициент k линейного расширения материала образца по формуле $k = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta t}$.

К совокупным измерениям относятся производимые одновременно измерения нескольких одноимённых величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. К совокупным относятся, например измерения, при которых массы отдельных гирь набора находят при известной массе одной из них и по результатам прямых измерений (сравнений) масс различных сочетаний гирь.

Абсолютное измерение – измерение, приводящее к значению измеряемой величины, выраженному в её единицах. Например, при измерении силы электрического тока амперметром или длины детали микрометром результат измерения выражается в единицах измеряемых величин (в амперах и миллиметрах).

Относительное измерение – измерение отношения величины к одноимённой величине, играющей роль единицы, или измерение величины по отношению к одноимённой величине, принимаемой за исходную. Относительное измерение основано на сравнении измеряемой величины с известным значением меры. Исходную величину при этом находят алгебраическим суммированием размера меры и показаний прибора. Примером является измерение относи-

тельной влажности воздуха, определяемой как отношение количества водяных паров в 1 куб.м воздуха к количеству водяных паров, которое насыщает 1 куб.м воздуха при данной температуре.

Однократное измерение – измерение, выполненное один раз. Например, измерение конкретного момента времени по часам. Когда нужна большая уверенность в получаемом результате, одного измерения оказывается недостаточно. Тогда выполняется несколько измерений одной и той же конкретной величины. В таких случаях допускается выражение: «двукратное измерение», «трёхкратное измерение» и т.д.

Многократное измерение – измерение одной и той же физической величины, когда результат получают из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. измерение, состоящее из ряда однократных измерений. Измерение считается многократным при проведении четырех и более измерений.

Статическое измерение – измерение физической величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения. Например, измерение длины детали при нормальной температуре, измерение размеров земельного участка.

Динамические измерения – измерения физической величины, размер которой изменяется с течением времени. Быстрое изменение размеров измеряемой величины требует её измерения с точной фиксацией момента времени. Например, измерение расстояния до уровня земли со снижающегося самолета.

Равноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях. Например, измерение диаметра вала гладким микрометром и индикаторной скобой.

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

Технические измерения – измерения при помощи рабочих средств измерений. Технические измерения выполняются с целью контроля и управления научными экспериментами, контроля параметров изделий, технологических процессов, управления движением различных видов транспорта, диагностики заболеваний, контроля загрязнённости окружающей среды и т.п.

Например, измерение давления пара в котле при помощи манометра, измерение ряда физических величин, характеризующих технологический процесс.

Метрологические измерения – измерения при помощи эталонов с целью воспроизведения единиц физических величин при передаче их размера рабочим средствам измерений. Например, при проведении поверки средств измерения.

Измерения, осуществляемые в различных областях науки и техники, обычно выполняются с помощью специальных средств и называются инструментальными. Они бывают автоматизированными (роль человека не исключена полностью), человек записывает в журнал данные, снимает показания с прибора и т.д. На результат влияют настроение, степень ответственности, раздражающие факторы, таким образом, сохраняется элемент субъективизма. При автоматических измерениях (роль человека полностью исключена) результат представлен в виде документа и совершенно объективен, однако, стоимость такого результата велика и целесообразность автоматических измерений всегда должна быть экономически обоснованной.

Измерения, основанные на использовании органов чувств человека, называются органолептическими (парфюмер).

Измерения, основанные на интуиции, называются эвристическими. При этом используется метод попарного сопоставления. Попарное сопоставление всегда лежит в основе любого выбора. Сравнить между собой два размера по шкале больше или меньше всегда легче, чем сразу устанавливать значения их значение. Поэтому настройщики музыкальных инструментов пользуются сначала камертоном, а потом ведут настройку, измеряя высоту звука по шкале интервалов.

Чтобы избежать ошибок прибегают к услугам нескольких специалистов – экспертов. Экспертный метод – метод, когда в измерении участвует несколько экспертов. Широко применяется в спорте, медицине, искусстве.

Результат измерения, выполненный человеком, зависит от множества факторов: настроения, степени сосредоточенности и т.д. Поэтому результат таких измерений является в какой-то мере случайным. Повторное измерение может дать иной результат. В народе говорят: «Семь раз отмерь, один раз отрежь».

Область измерений – совокупность измерений физической величины, соответствующая какой-либо области науки или техники. Например, измерение длины в технике, в геодезии и астрономии.

Вид измерений – часть области измерений. Различают 12 видов измерений: измерение геометрических величин (длина, угол); измерение механических величин (масса, твердость); измерение параметров потока, расхода, объема; измерение давления; физико-химические измерения (вязкость); измерение температурных и теплофизических величин; измерение времени и частоты; измерение электрических и магнитных величин; радиоэлектронные измерения; акустические измерения; оптические и оптико-физические измерения; измерения ионизации веществ.

1.4. Шкалы свойств физических величин, типы шкал

Под измерением в общем случае понимают процедуру количественной или качественной оценки рассматриваемого свойства. Это становится возможным, если удаётся сформировать шкалу свойств с учетом логических отношений.

Шкала свойств физической величины – упорядоченная последовательность ее значений, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений.

В теории измерений принято различать пять типов шкал: наименования; порядка; разностей; отношений и абсолютные.

Шкала «наименования» характеризуется только отношением эквивалентности, в связи с этим в них отсутствует понятия нуля, «больше» или «меньше» и единицы измерения. Примером номинальных шкал являются широко распространенные атласы цветов, предназначенные для идентификации цвета.

Шкала «порядка» соответствует свойствам, для которых имеет смысл не только отношение эквивалентности, но и отношение порядка (шкала твердости). Например, шкала твердости Мооса содержит 10 опорных (реперных) минералов с различными условными числами твердости: тальк – 1, гипс – 2, кальций – 3, флюорит – 4, апатит – 5, ортоклаз – 6, кварц – 7, топаз – 8, корунд – 9, алмаз – 10. Эксперимент состоит в том, что испытуемый материал царапается опорным. Если после царапанья испытуемого материала топазом (8) на нем остается след, а после кварца (7) – не остается, то твердость испытуемого материала составляет более 7, но менее 8.

Шкала «разностей» («интервалов») отличается от шкалы «порядка» тем, что имеет смысл отношение эквивалентности, порядка и суммирования интервала (разностей) между различными количественными проявлениями свойства (шкала времени). Шкала «интервалов» состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу измерения и произвольно выбранное начало – нулевую точку. Пример

шкалы интервалов – летоисчисление по различным календарям, в которых за начало отсчета принято либо сотворение мира, либо рождение Христово и т.д. Температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта и Реомюра также являются шкалами «интервалов». Интервалы времени можно суммировать (вычитать), но складывать, например даты каких-либо событий, не имеет смысла.

Шкала «отношений» описывает свойства эквивалентности, порядка, суммирования, вычитания и умножения. В шкалах отношений существует однозначный естественный критерий нулевого количественного проявления свойства и единица измерений, установленная по соглашению. С формальной точки зрения этот вид шкал измерений является шкалой интервалов с естественным началом отсчета. К значениям, полученным по этой шкале, применимы все арифметические действия, что имеет важное значение при измерениях физических величин, например шкала длин.

«Абсолютные» шкалы обладают всеми признаками шкалы «отношений», но дополнительно в них существует естественное однозначное определение единицы измерения. Такие шкалы соответствуют относительным величинам, например коэффициент усиления, коэффициент полезного действия.

Большинство свойств описываются одномерными шкалами, однако, они могут быть и многомерными. Имеются свойства, которые можно описать только многомерными шкалами, например, трехмерные шкалы цвета в колориметрии, где цвет описывается тремя координатами X, Y, Z .

2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

2.1. Виды средств измерения

Средства измерения – технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики. Различают 5 видов средств измерения:

- 1) меры;
- 2) преобразователи;
- 3) приборы;
- 4) установки;
- 5) системы.

Мерой называют средство измерения, предназначенное для воспроизведения и хранения физических величин одного или нескольких заданных размеров, значение которых выражаются в условных единицах и известны с необходимой точностью. Различают меры однозначные (гири), многозначные (линейка), наборы мер – специально подобранный комплект мер, который может использоваться отдельно и в сочетании. Если набор мер конструктивно объединен в устройство, то его называют магазином мер. Мера, предназначенная для сравнения с ней размеров, формы и расположения поверхностей, называется калибром. Мерами являются стандартные образцы, служащие для воспроизведения единиц величины, характеризующих свойства и состав веществ.

Измерительные преобразователи – технические средства, перерабатывающие измерительную информацию в форму, удобную для дальнейшей переработки, хранения и передачи, и имеющие нормированные метрологические характеристики. Различают первичные, промежуточные, передающие и масштабные преобразователи. Конструктивно обособленные преобразователи называются датчиками (термопара).

Датчик может быть вынесен на значительное расстояние от СИ, принимающего его сигналы. Например, датчики запущенного метеорологического радиозонда передают информацию о температуре, давлении, влажности и других параметрах атмосферы.

Измерительные приборы – средства измерения, предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Приборы делятся на две группы: прямого действия и сравнения. Приборы прямого действия (непосредственной оценки) позволяют получать значение измеряемой величины непосредственно на отсчетном устройстве и не требуют сравнения с мерой (амперметры, вольтметры, манометры). В приборах сравнения значение измеряемой величины определяется сравнением с известной величиной, воспроизводимой мерой, поэтому точность этих приборов определяется точностью меры.

Приборы делятся на показывающие и регистрирующие. Показывающие приборы делятся на цифровые и аналоговые. Цифровые автоматически выдают дискретные сигналы в цифровой форме. Достоинства: просто автоматизировать, время измерения мало, легко соединить с ЭВМ и ввести информацию, процесс измерения автоматизирован и исключает погрешность оператора. Аналоговые – стрелочные приборы (состоят из шкалы и указателя). Показание прибора есть функция измеряемой величины. Регистрирующие – самопишущие, выдающие сигнал в виде диаграмм, или печатающие.

СИ могут быть функционально объединены в измерительные установки. Измерительная установка – совокупность функционально объединённых средств измерения и вспомогательных устройств, и расположенных в одном месте. Например, поверочные установки, установки для испытания электротехнических и других материалов. Измерительная установка позволяет предусмотреть

определенный метод измерения и заранее оценить погрешность измерения.

Измерительная система – это комплекс СИ и вспомогательных устройств с компонентами связи, предназначенный для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления. Связь между элементами системы осуществляется по проводным или беспроводным каналам. В отличие от измерительных установок, предусматривающих изменения режима и условий функционирования, измерительная система не воздействует на режимы работы, а предназначена только для сбора и хранения информации.

2.2. Метрологические характеристики средств измерений

Все средства измерения независимо от их конкретного исполнения обладают рядом общих свойств, необходимых для выполнения ими их функционального назначения. Технические характеристики, описывающие эти свойства и оказывающие влияние на результат и погрешность измерения, называются метрологическими характеристиками. Перечень важнейших из них регламентируется ГОСТом.

К числу нормированных метрологических характеристик относятся:

- 1) характеристики погрешностей средств измерения;
- 2) характеристика случайной составляющей погрешности средств измерения;
- 3) характеристика систематической составляющей погрешности средств измерения;
- 4) вариация показаний измерительного прибора (разница показаний измерительных приборов при двух направлениях измерения величины в процессе подхода к данной точке);
- 5) входное сопротивление измерительного прибора;

- б) пределы шкалы измерительного прибора;
- 7) цена деления равномерной шкалы измерительного прибора;
- 8) выходной код, число разрядов, цена единицы наименования разряда для числовых приборов;
- 9) номинальное значение однозначной меры;
- 10) номинальная статическая характеристика преобразования измерительного преобразователя;
- 11) выходное сопротивление измерительного преобразователя и другие.

Одной из основных метрологических характеристик является статическая характеристика преобразования. Она устанавливает зависимость выходного сигнала от входного $y = f(x)$. Она задаётся в форме уравнения, графика или таблицы для конкретного преобразователя. Понятие статической характеристики применимо к измерительному преобразователю и к измерительным приборам. Здесь под входным сигналом понимают значение измеряемой величины, а под y – показание прибора. Если статическая характеристика линейна, $y = kx$, то k – чувствительность прибора или преобразователя.

Важной метрологической характеристикой шкальных измерительных приборов является цена деления, это то изменение измеряемой величины, которому соответствует перемещение указателя на одно деление шкалы. Шкалы бывают равномерные и неравномерные. Если чувствительность постоянна в каждой точке диапазона измерений, то шкала равномерна. При неравномерной шкале нормируется наименьшая цена деления. У цифровых приборов шкалы в явном виде нет. Для них ценой деления является цена единицы младшего числа показания прибора.

Входное сопротивление измерительного прибора должно быть малым, чтобы методическая погрешность от включения его в цепь,

желательно, была меньше цены деления. Если этого достичь не удастся, то вводится методическая поправка.

Рассмотрим пример. Оценка мощности рассеиваемой на резисторе проводится по формуле $P = I^2 R$. Изменения проводились в нормальных условиях амперметром с внутренним сопротивлением $R_a = 1 \text{ Ом}$. Показание амперметра равно $I = 4,2 \text{ А}$. Показание омметра составляет $R = 8,3 \text{ Ом}$. Определяем методическую погрешность от включения амперметра:

$$\Delta_{\text{мет}} = \frac{U}{R+R_A} - \frac{U}{R} = -I \cdot \frac{R_A}{R+R_A} = -4,2 \cdot \frac{1}{8,3+1} = -0,45.$$

$$I_{\text{исправленное}} = I - \Delta_{\text{мет}} = 4,2 - (-0,45) = 4,65.$$

Первая дробь – это ток в цепи с амперметром, минус ток в цепи без амперметра. Проводим преобразования и получаем третью дробь. Подставляем цифровые значения. Таким образом, реальный ток в цепи до включения амперметра был 4,65 А.

Вариация показаний измерительного прибора это разница показаний измерительных приборов при двух направлениях измерения величины в процессе подхода к данной точке. Это проверяется при поверке. Сначала увеличивают значения величины и при подходе стрелки справа к значениям (...20; 40; 60...) получают значения (19,97; 39,98; 59,97). Сравнивают с эталонным прибором и получают разницу (-0,03; -0,02; -0,03). Затем уменьшают величину и подводят к поверяемой точке слева. При этом получают значения (60,01; 40,01; 20,01). Разница с эталонным прибором равна (+0,01; +0,01; +0,01). Вариация это разница показаний измерительных приборов при двух направлениях измерения величины в процессе подхода к данной точке. В точке 20 вариация равна $0,03+0,01=0,04$. В точке 40 вариация равна $0,02+0,01=0,03$. Вариация связана со свойствами механизма прибора, пружинами, ограничителями, которые не сразу приходят в исходное положение. Вариация должна быть меньше заданных требований на поверку.

2.3. Погрешности средств измерения

Важнейшей характеристикой средств измерения является погрешность. Под абсолютной погрешностью меры понимают алгебраическую разность между её номинальным и действительным значениями:

$$\Delta = x_{\text{Н}} - x_{\text{Д}}$$

Под абсолютной погрешностью измерительного прибора понимают разность между его показанием и действительным значением измеряемой величины:

$$\Delta = x_{\text{П}} - x_{\text{Д}}$$

Абсолютная погрешность измерительного преобразователя выражается в единицах входной или выходной величины. В единицах входной величины она определяется как разность между значением входной величины x , найденной по действительному значению выходной величины и номинальной статической характеристики преобразователя, и действительным значением входной величины:

$$\Delta = x - x_{\text{Д}}$$

Однако, обычно средства измерения характеризует относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности к действительному значению, выраженному в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_{\text{Д}}} \cdot 100\%$$

Обычно δ много меньше 1, поэтому в эту формулу может быть подставлено номинальное значение меры или показания прибора (вместо $x_{\text{Д}}$).

Если диапазон прибора охватывает нулевое значение, то Δ в точке 0 будет равен бесконечности.

На практике пользуются приведённой погрешностью. Она равна отношению абсолютной погрешности к некоторому номинальному значению:

$$j = \frac{\Delta}{x_n} \cdot 100\%.$$

В качестве этого значения может быть принят диапазон измерения, верхний предел измерения и т.д. Правила выбора x_n определены ГОСТ 8.009-84 Нормируемые метрологические характеристики средств измерения.

Одной из важнейших характеристик средств измерения является метрологическая надёжность.

2.4. Метрологическая надёжность средств измерения

Метрологическая надёжность – свойство средства измерения сохранять установленное значение метрологических характеристик в течение определенного времени при нормальном режиме работы и условиях эксплуатации.

В процессе эксплуатации средства измерения может возникнуть неисправность, называемая отказом. Метрологическим отказом называется выход метрологических характеристик средства измерения за пределы нормы. Внезапные отказы носят случайный характер. Основным показателем надёжности СИ является интенсивность отказа:

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot m_i,$$

где λ_i – интенсивность отказа каждой составляющей элемента средства измерения (λ_i берётся из справочника или экспериментально); n – количество типов элементов, входящих в данное средство измерения; m_i – количество элементов n -ого типа. Вероятность безотказной работы: $P(t) = e^{-\int_0^t \lambda_{\Sigma}(t) dt}$.

Среднее время безотказной работы называется наработкой на отказ: $T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt$

Так как случайный отказ может произойти в любой момент времени, то интенсивность внезапного отказа от времени не зависит.

Поэтому, когда речь идёт о внезапных отказах, вероятность безотказной работы и наработка на отказ определяются более простыми выражениями:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma}t},$$
$$T_{\text{ср}} = \frac{L}{\lambda_{\Sigma}},$$

где L – число отказов.

Внезапные отказы могут быть явными – легко обнаруживаться и устраняться и скрытыми – обнаруживаются только при проверке.

Ремонтопригодность средства измерения – способность средства измерения 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 средства измерения после метрологического отказа и поддержание его в работоспособном состоянии.

Процесс измерения метрологических характеристик идет непрерывно и независимо от того, используется ли средство измерения или оно хранится на складе.

Межповерочный интервал определяется формулой:

$$T_{\text{МП}} = \frac{\ln(1 - P_{\text{м отк}})}{\ln P_m(t)} \cdot t,$$

где $P_m(t)$ – вероятность безотказной в метрологическом смысле работы; $P_{\text{м отк}}$ – вероятность метрологического отказа за время между поверками.

Для средств измерения, используемых в технике, $P_{\text{м отк}}$ берётся 0,1 – 0,2. При особо важных измерениях – из интервала от 0,01 до 0,05.

2.5. Классы точности средств измерения

Учёт всех метрологических характеристик средств измерения – очень сложная и трудоемкая задача (оправданная только при измерениях очень высокой точности), поэтому для средств измерения, используемых в повседневной практике, принято деление их на классы точности.

Классом точности называется обобщённая характеристика всех средств измерения данного типа, обеспечивающая правильность их показания и устанавливающая оценку снизу точности показания. Классы точности устанавливаются в стандартах или технических условиях, содержащих технические требования к средствам измерений, подразделяемым по точности. Необходимость подразделения средств измерений по точности определяют при разработке этой документации.

В стандартах на средства измерения конкретного типа установлены требования к метрологическим характеристикам, в совокупности определяющих класс точности. Так, например, у плоскопараллельных концевых мер длины, такими характеристиками являются: пределы допускаемых отклонений от номинальной длины и плоскопараллельности, пределы допускаемого изменения длины в течение года.

Классы точности присваиваются типам средств измерения при выпуске, с учётом результатов государственных приёмочных испытаний. Класс точности может понижаться при эксплуатации. При этом выпускается соответствующий документ.

Средствам измерения с несколькими диапазонами измерения одной и той же физической величины или предназначенных для измерения разных физических величин, могут быть присвоены различные классы точности для каждого диапазона или каждой измеряемой величины. Так, например, амперметр с диапазонами от 0 до

10, от 0 до 20 и от 0 до 50 может иметь разные классы точности для отдельных диапазонов; электроизмерительному прибору, предназначенному для измерений напряжения и сопротивления, могут быть присвоены два класса точности: один – как вольтметру, другой – как омметру.

Обозначения классов точности наносятся на циферблаты, щитки и корпуса средств измерения, приводятся в нормативно-технической документации. При этом рядом с обозначением стоит номер нормативного документа, по которому он назначен. Обозначения могут иметь форму заглавных букв латинского алфавита (M, C и т.д.) или римских цифр (I, II, III, IV) с добавлением условных знаков. Смысл таких обозначений указывается в нормативно-технической документации. Если класс точности обозначается арабскими цифрами с добавлением какого-либо условного знака, то эти цифры непосредственно устанавливают оценку точности измерения.

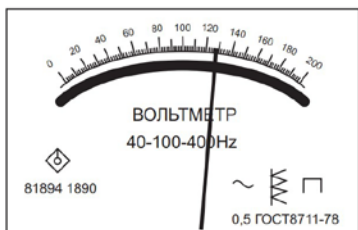
Для средств измерения с равномерной или степенной шкалой, нулевое значение которой находится на краю или вне диапазона измерений, обозначение классов точности берётся из ряда:

$$(1; 1,5; (1,6); 2; 2,5; (3), 4, 5, 6) \cdot 10^n,$$

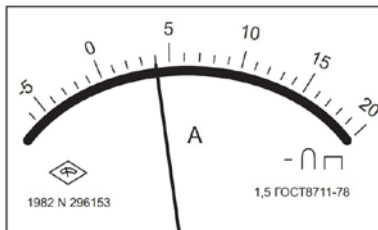
где $n=1, 0, -1, -2$ и т.д.

Значения 1,6 и 3 – это допускаемые значения, но не рекомендуемые. Например, если класс точности прибора 0,5, то это значит, что измеряемая величина не отличается от того, что показывает указатель отсчётного устройства больше, чем на соответствующее число процентов от верхнего предела измерения.

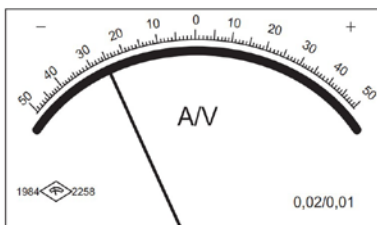
Примеры обозначения классов точности на панелях средств измерений приведены на рис. 1.



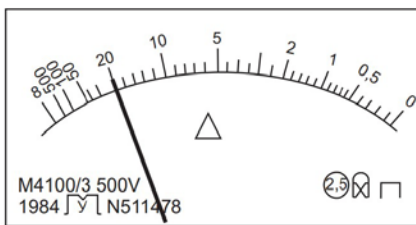
a



б



в



г

Рис. 1. Примеры обозначения классов точности на панелях средств измерений:
a – обозначение класса точности через величину приведенной погрешности от нормирующего значения (вольтметр класса точности 0,5);
б – обозначение класса точности через величину приведенной погрешности непосредственно от измеряемой величины (амперметр класса точности 1,5);
в – обозначение класса точности через пределы допускаемой относительной основной погрешности (амперметр класса точности 0,02/0,01);
г – обозначение класса точности через пределы допускаемой относительной основной погрешности (мегомметр класса точности 2,5 с неравномерной шкалой)

Устанавливая класс точности, нормируют, прежде всего, пределы допускаемой основной погрешности. В соответствии с ГОСТ 8.401-80 в качестве основных устанавливается три вида классов точности, когда пределы допускаемой основной погрешности выражены:

- 1) в форме абсолютной;
- 2) в форме относительной;
- 3) в форме приведенной погрешности.

Форма нормирования выбирается в зависимости от изменения погрешности по диапазону измерения, назначения и условий применения СИ.

Гостом установлено, что:

- если погрешность принято выражать в единицах измеряемой величины, то принимается форма абсолютной погрешности;
- если границы абсолютной погрешности постоянны в пределах диапазона измерений, то принимается приведенная погрешность;
- если границы нельзя считать постоянными, то принимается относительная погрешность.

Другими словами, определение погрешности результата измерения имеет следующие варианты:

- если значения класса точности даны арабскими цифрами, то погрешность равна соответствующему числу процентов от верхнего предела измерения;
- если значения даны арабскими цифрами, обведенными в кружок, то погрешность равна соответствующему числу процентов от того, что показывает указатель отсчетного устройства;
- если значения даны дробью c/d , где c – точность в процентах в начале шкалы, а d – точность в процентах в конце шкалы, расчет ведется по формуле:

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

где X_k - верхний предел измерения, x – показания СИ.

3. ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Факторы, влияющие на процесс измерения

Получение отсчёта (показания средства измерения) – основная измерительная процедура. Однако во внимание должно приниматься ещё множество факторов, влияющих на отсчет, а именно:

- 1) объект измерения;
- 2) субъект измерения;
- 3) метод измерения;
- 4) средство измерения;
- 5) условия измерения.

Объект измерения должен быть изучен. Необходимо перед измерением представить себе модель исследуемого объекта, который по мере поступления измерительной информации будет изменяться и уточняться. Чем полнее модель соответствует измеряемому объекту, тем точнее измерительный эксперимент. Например, при измерении диаметра вала нужно быть уверенным в том, что он круглый, в противном случае может быть нужно измерять эллипсность его сечения. При измерении сельскохозяйственных угодий пренебрегают кривизной поверхности земли, чего нельзя делать при измерении поверхности океанов. Измеряя плотность вещества, нужно быть уверенным в отсутствии в нем инородных включений.

Экспериментатор вносит элемент субъективизма, который стараются уменьшить. Он зависит от квалификации измерителя, его психологического состояния, соблюдения эргономических требований. К измерениям допускаются лица прошедшие специальную подготовку. В ответственных случаях их действия должны быть строго регламентированы. Особенно большую роль играет профессиональная подготовка экспертов при эвристических и органолептических измерениях. Наибольшая работоспособность наблюдается в утренние и дневные часы с 8 до 12 часов и с 14 до 17 часов. В пе-

риод 12 до 14 часов и в вечерние часы отмечается снижение работоспособности, а в ночные часы работоспособность минимальна. Санитарно-гигиенические требования к условиям труда включают такие факторы, как микроклимат, освещение, производственный шум, вибрацию, чистоту воздуха и т.д. Максимальная острота зрения наступает при освещении (600-1000) лк. Уровень шума не должен превышать (40-45) дБ.

Очень часто измерения одной и той же величины разными способами даёт разные результаты. Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. Со временем выработались определенные приемы, знание которых помогает в преодолении недостатков каждого способа измерения. Исключение влияющих факторов осуществляется следующими методами:

а) метод замещения состоит в замене измеряемой величины равновеликой ей мерой, значение которой известно. Так, при взвешивании на равноплечих весах масса груза считается равной массе уравновешивающих гирь. Однако, это справедливо только при строгом равенстве плеч, поскольку равенство коромысла предусматривает равенство не масс, а произведения силы на плечо. На практике плечи строго не равны между собой, поэтому, груз уравновешивается не равным его массе набором гирь. При использовании способа замещения груз уравновешивается любой тарой, а потом заменяется набором гирь, при котором сохраняется равновесие коромысла. Масса груза в таком случае равна массе гирь, а влияние неравноплечности весов оказывается исключенным;

б) при использовании метода компенсации влияющего фактора по знаку измерения проводят 2 раза так, чтобы влияющий фактор оказывал противоположные действия, и берут среднее арифметическое двух опытов. Например, механические узлы некоторых СИ

имеют люфты, влияние которых компенсируется, если измерительный механизм подводится к измеряемой величине сначала со стороны больших, а затем меньших значений;

в) если влияющий фактор приводит не к изменению измеряемого значения на некоторую величину, а к умножению его на некоторый коэффициент, то используется метод противопоставления. Рассмотрим его на примере взвешивания на равноплечих весах. Уравнение коромысла записывается следующим образом:

$$m \cdot l_1 = m_{\Gamma} \cdot l_2,$$

где m – масса взвешиваемого груза, m_{Γ} – масса уравновешивающих гирь, l_1 и l_2 – плечи коромысла.

Если повторить взвешивание, поместив груз на чашу весов, на которой были ранее гири, получим:

$$m'_{\Gamma} \cdot l_1 = m \cdot l_2,$$

где $m_{\Gamma} \neq m'_{\Gamma}$. Разделив первое уравнение равновесия на второе получим $\frac{m}{m'_{\Gamma}} = \frac{m_{\Gamma}}{m}$, откуда $m = \sqrt{m_{\Gamma} \cdot m'_{\Gamma}}$, или с достаточной точностью $m \approx \frac{m_{\Gamma} + m'_{\Gamma}}{2}$. Т.е. влияние неравноплечности весов оказывается исключенным.

г) метод симметричных измерений используется тогда, когда влияющий фактор является линейной функцией времени (например, постепенного прогрева аппаратуры, падение напряжения в цепи в связи с разрядом батарей и т. д.). При этом методе в течение некоторого интервала времени производится несколько измерений одного и того же размера и берётся полусумма отдельных результатов, симметричных по времени относительно середины интервала.

Влияние самого средства измерения на измеряемую величину во многих случаях проявляется как возмущающий фактор. Ртутный термометр, помещенный в пробирку с охлажденной жидкостью подогревает ее, и показывает не первоначальную температуру жидко-

сти, а температуру, при которой устанавливается термодинамическое равновесие. Некоторые средства измерения могут давать постоянно завышенные, или заниженные результаты, (вследствие дефектов при изготовлении, нелинейности преобразования, которое считается линейным т.д.) Такие особенности средств измерения выявляются при их аттестации, при которой показания при измерении одной и той же физической величины сравниваются с показанием более точного средства измерения. По итогам аттестации устанавливается поправка (в виде таблицы, графика, формулы и т.д.), которую нужно вносить в показания средства измерения.

К числу влияющих факторов относятся условия измерений. Сюда входят температура окружающей среды, влажность, атмосферное давление, тряска, вибрация, электрические и магнитные поля.

Если измерения не удаётся организовать так, чтобы исключить влияющие факторы, то в результаты вносится поправка. Поправки определяются теоретически или экспериментально. Они представляют собой функцию, таблицу, график или число.

3.2. Погрешности при проведении измерений

Погрешности измерения подразделяются на статические и динамические. Статические имеют место при измерениях постоянных величин после завершения переходных процессов (завершении уравнивания чашки весов при взвешивании). Динамические появляются при измерении переменных величин и обусловлены инерционными свойствами средств измерения. Динамической погрешностью средств измерения является разность между погрешностью средств измерения в динамических условиях и его статической погрешностью соответствующего значения величины в данный момент времени.

Согласно общей классификации, статические погрешности средств измерений имеют систематическую и случайную составляющую.

Систематической называют составляющую погрешности, остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины.

Причины их возникновения:

- 1) упругая деформация деталей средств измерения, имеющих малую жёсткость, приводящую к дополнительным перемещениям;
- 2) погрешность градуировки и небольшой сдвиг шкалы;
- 3) неравномерный износ направляющих устройств для базирования измеряемых деталей;
- 4) износ рабочих поверхностей деталей средств измерений;
- 5) усталостные изменения упругих средств деталей и их старение т.д.

Ряд постоянных погрешностей внешне себя не проявляют, их можно обнаружить только при проверке.

Систематические погрешности подразделяются на аддитивные и мультипликативные. Аддитивной погрешностью называется погрешность, постоянную в каждой точке шкалы. Мультипликативной погрешностью называется погрешность, линейно возрастающую или убывающую с ростом измеряемой величины.

Рассмотрим пример определения систематической погрешности. При измерении диаметра цилиндрической детали штангенциркулем ШЦ-II-0,05 получен результат $x_{\text{си}}=25,75$ мм. Необходимо определить поправку, которую необходимо внести в показания прибора, используя набор плоскопараллельных концевых мер длины. Такой же результат (25,75 мм) получаем при измерении штангенциркулем блока концевых мер размером $x_{\text{м}}=25,65$ мм.

Тогда $x=25,65$ мм, а систематическая погрешность штангенциркуля равна $\Delta_{\text{сист}} = 25,75 - 25,65 = 0,1$ мм.

Таким образом, поправка, которую необходимо ввести в показания штангенциркуля: $\Delta_n = -\Delta_{сисм} = -0,1$ мм.

Случайной называют составляющую погрешности измерения, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Случайные погрешности возникают при одновременном воздействии множества факторов, каждый из которых незначителен, но суммарное воздействие оказывается сильным. В общем случае погрешность измерения является случайной функцией времени, т.е. невозможно определить какое значение примет погрешность в момент времени t . В серии экспериментов, состоящих из ряда многократных наблюдений, получают одну реализацию этой функции. При повторении серии наблюдений той же величины получим новые реализации функции. Погрешность измерений, соответствующая каждому моменту времени t , называют сечением случайной функции. Для каждого сечения можно определить статистические характеристики: среднее значение погрешности, средние квадратичные ошибки и т.д.

Из-за неправильной деятельности операторов, а также из кратковременных, резких изменений условий измерений, могут возникать грубые погрешности или промахи. Если грубые погрешности обнаруживаются в процессе измерения, то эти результаты отбрасываются. Однако чаще промахи выявляются только при обработке результатов измерения с помощью различных критериев.

4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Основной постулат метрологии

Любое измерение по шкале отношений предполагает сравнение неизвестного размера с известным и выражение первого через второе в кратном или дольном отношении:

$$\frac{Q}{[Q]} \quad (1)$$

На практике непосредственно неизвестный размер не всегда может быть представлен для сравнения с единицей. Например, жидкость взвешивается в таре, тогда $\frac{Q+V}{[Q]}$, где V – вес тары. Небольшие линейные размеры для измерения необходимо увеличить с помощью микроскопа. Тогда $\frac{Q \cdot \varkappa}{[Q]}$, где \varkappa – коэффициент увеличения микроскопа.

Само сравнение происходит под влиянием множества случайных и неслучайных, аддитивных (прибавляемых) и мультипликативных (умножаемых) факторов, точный учет которых невозможен, а результат совместного действия непредсказуем. Ограничиваясь для простоты аддитивными воздействиями, совместное влияние которых можно учесть случайной составляющей η получим уравнение измерений по шкале отношений:

$$\frac{Q+V}{[Q]} + \eta = x, \quad (2)$$

где η – случайная составляющая (носит случайный характер), x – показания прибора.

Данное уравнение выражает некоторое действие, процедуру сравнения в реальных условиях, т.е. измерение. Главной особенностью измерительной процедуры является то, что из-за случайного характера η отсчет по шкале отношений (x) получается все время разным.

Это фундаментальное положение является законом природы. На основании громадного опыта практических измерений может быть сформулировано утверждение, называемое основным постулатом метрологии: «Отсчет является случайным числом». На этом постулате, который остается справедливым в любых областях и видах измерений, основана вся метрология.

Уравнение (2) является математической моделью измерения по шкале отношений. Отсчет в ней (x) не может быть представлен одним числом, его можно описать словами, математическими символами, представить массивом экспериментальных данных, таблицей, графиком, аналитическим выражением и т.д.

Проиллюстрируем это примером: при n -кратном измерении одной и той же величины постоянного размера на световом табло цифрового измерительного прибора случайным образом появляются значения x_i , представленные в первой графе табл. 1. Каждое i -число повторялось m_i раз (вторая графа). Что представляет собой отсчет при таком измерении?

Таблица 1. Результаты измерения некоторой линейной физической величины постоянного размера цифровым измерительным прибором

x_i	m_i	$P(x_i)$	$F(x_i)$
90,10	1	0,01	0,01
90,11	2	0,02	0,01+0,02=0,03
90,12	5	0,05	0,03+0,05=0,08
90,13	10	0,1	0,08+0,1=0,18
90,14	20	0,2	0,18+0,2=0,38
90,15	24	0,24	0,38+0,24=0,62
90,16	19	0,19	0,62+0,19=0,81
90,17	11	0,11	0,81+0,11=0,92
90,18	5	0,05	0,92+0,05=0,97
90,19	2	0,02	0,97+2=0,99
90,20	1	0,01	0,99+0,01=1

Решение: ни одно из чисел первого столбца не является отсчетом. Отсчет характеризуется всей совокупностью этих чисел с учетом того, как часто они появлялись. Примем частоту m_i/n каждого i -го числа за вероятность его появления $P(x_i)$, заполним 3-й столбец. В совокупности с 1-ым столбцом, это даст нам распределение вероятности отсчета, представленное в виде таблицы. Графически это выглядит, как показано на рис. 2:

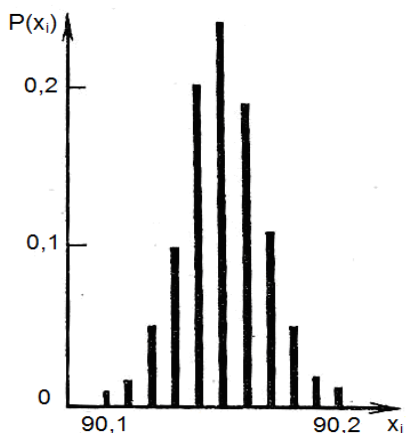


Рис.2. Распределение вероятности отсчета у цифрового измерительного прибора

Представим в 4-ой графе вероятности того, что на табло измерительного прибора появится число, меньшее или равное тому, которое значится в 1-ой графе. В совокупности с 1-ой графой это даст нам представленную таблично функцию распределения вероятности отсчета.

Распределение вероятности $P(x_i)$, и функция распределения вероятности $F(x_i)$ являются исчерпывающим описанием отсчета у измерительных приборов любой конструкции. Они служат в теории

вероятности моделями эмпирических законов распределения, полученных из экспериментальных данных методами математической статистики.

Описание отсчёта или результата измерений с помощью законов распределения вероятностей является наиболее полным, но неудобным.

В метрологии используют оценки числовых характеристик законов распределения вероятности случайных величин. Основные из них среднее арифметическое

$$\bar{Q}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (3)$$

и стандартное отклонение:

$$S_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2}{n-1}}. \quad (4)$$

После проведения процедуры измерения в уравнении (2) остаётся 2 неизвестных Q и η . Неслучайное значение V вес тары либо должно быть известно до измерения, либо установится с помощью дополнительных исследований. Слагаемое η является случайным и не может быть известно в принципе. Поэтому определить значение измеряемой величины невозможно

$$Q = x[Q] - \eta[Q] - V. \quad (5)$$

Равенство (3) соблюдается точно благодаря тому, что при повторных выполнениях измерительной процедуры случайное изменение 2-го слагаемого в правой части влечет за собой точно такое же изменение 1-го. О таких слагаемых говорят, что они коррелированы (взаимосвязаны между собой).

Разность между коррелированными значениями двух случайных величин не случайна, но в данном случае неизвестна. Поэтому строгого решения уравнение (3) не имеет. На практике пользуются приближенным решением, для этого используют результаты специ-

альных исследований (метрологическая аттестация средств измерения, методики выполнения измерений и т.д.). В ходе этих исследований приближенно определяется среднее значение $H \approx \eta[Q]$. Среднее значение не является случайным, поэтому после замены случайного 2-го слагаемого в правой части на неслучайное H , получится приближенное решение:

$$Q \approx x[Q] - H - V.$$

В этом выражении результат измерения Q является случайным значением измеряемой величины. Первое слагаемое $X = x[Q]$ называется показанием. Оно подчиняется тому же закону вероятности, что и отсчет. Два последних слагаемых представляют собой суммарную поправку $\Theta = -H - V$, которая может включать и большее количество составляющих, в зависимости от числа учитываемых факторов. Поправка не является случайной, но может изменяться от измерения к измерению по определенному закону. Поэтому в каждое отдельное показание X_i может вноситься своя поправка Θ_i . Т.е. результат измерения Q подчиняется тому же закону распределения вероятности, что показание и отсчет, но смещенному по оси абсцисс на величину поправки. Отдельное его значение:

$$Q_i \approx X_i + \Theta_i. \quad (4)$$

получаемое всякий раз после выполнения измерительной процедуры, называется результатом однократного измерения.

При многократном измерении одной и той же величины постоянного размера среднее арифметическое значение результата измерения (3) называется результатом многократного измерения.

Уравнение измерения интервала записывается аналогично: $\frac{\Delta Q + V}{[Q]} + \eta = x$, где ΔQ – значение разности между двумя физическими величинами.

Математической моделью измерения по шкале порядка:

$$Q_1 + \eta_1 \geq Q_2 + \eta_2. \quad (5)$$

Это выражение описывает процедуру сравнения двух размеров одной и той же измеряемой величины. Результатом сравнения является не отсчет, а решение о том, какой из размеров больше, либо они одинаковы. Не исключена возможность как правильных, так и неправильных решений, следовательно, результат сравнения двух размеров по шкале порядка является случайным, что соответствует основному постулату метрологии.

4.2. Однократное измерение

Подавляющее большинство измерений являются однократными. (В обиходе, в торговле, во многих областях производственной деятельности выполняются только однократные измерения, а их простота, высокая производительность и низкая себестоимость ставят их вне конкуренции.) Результат однократного измерения записывается выражением: $Q_i = X_i + \theta_i$.

Сам по себе он ни о чем не говорит, т.к. является случайным значением измеряемой величины. Необходимым условием проведения однократного измерения служит наличие априорной информации. К ней относятся: информация о виде закона распределения, вероятности показания и мере его рассеяния, которое извлекают из опыта предыдущих измерений. Если её нет, то используется информация о том, насколько значение измеряемой величины может отличаться от результата однократного измерения (такая информация представлена классом точности средства измерения).

К априорной относится информация о значении аддитивной и мультипликативной поправки. Если оно не известно, то необходимо пользоваться ситуационной моделью, согласно которой значение поправки может быть любым в пределах от Θ_{\min} до Θ_{\max} . Без априорной информации однократное измерение бессмысленно.

Порядок выполнения однократного измерения:

1) Проводят тщательный предварительный анализ априорной информации (уточняется физическая сущность явления, его модель,

определяются влияющие факторы, значения поправок, выбирается методика измерения, средство измерения, изучается опыт проведения таких измерений в прошлом). Итогом этой работы должна стать уверенность, что точности однократного измерения достаточно для решения поставленной задачи.

2) Получение одного значения отсчёта.

3) Отсчёт, согласно основному постулату метрологии, является случайным числом. Дефицит информации восполняется только за счет априорных сведений. Единственное значение x_i переводится в показание X_i средства измерения, имеющее ту же размерность, что и измеряемая величина $X_i = x_i[Q]$.

4) В показание вводится поправка Θ_i . Если ее значение известно, то результат будет представлен единственным значением $Q_i = X_i + \theta_i$. Если значение поправки не известно точно, то результат однократного измерения с равной вероятностью может быть в пределах от $X_i + \theta_{\min}$ до $X_i + \theta_{\max}$.

5) Определение максимально возможного отклонения ε , результата однократного измерения Q_i от значения измеряемой величины.

6) Определение пределов, в которых находится значение измеряемой величины $(Q_i - \varepsilon) \leq Q_i \leq (Q_i + \varepsilon)$.

Целью измерительного эксперимента является получение достоверной количественной информации о значении величины Q . При проведении измерений никто не застрахован от ошибок. Может оказаться ошибочным и единственное значение отсчета X_i при однократном измерении. Во избежание такой ошибки однократное измерение рекомендуется повторить от 2 до 3 раз без совместной обработки полученных результатов.

4.3. Обработка результатов многократных измерений

Многократное измерение одной и той же величины постоянного размера проводится при повышенных требованиях к точности.

Они характерны для профессиональной метрологической деятельности и в научных исследованиях. Результат многократного измерения при нормальном распределении результатов измерения записывается выражением (3).

Как и результат однократного измерения, он является случайной измеряемой величиной, но его дисперсия в n -раз меньше:

$$D\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n Q_i\right) = \frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^n D(Q_i) = \frac{n \cdot s_Q^2}{n^2} = \frac{s_Q^2}{n}.$$

Благодаря этому обстоятельству при увеличении числа измерений точность повышается на \sqrt{n} раз.

При многократном измерении информация о законе распределения вероятности результата измерения, получается опытным путём. Вслед за анализом априорной информации и тщательной подготовкой к многократному измерению получают n независимых значений отсчёта с помощью одного и того же средства измерения. Отсчёт в этом случае будет описываться эмпирической плотностью распределения вероятности: $P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, где согласно основному постулату метрологии каждое значение отсчёта является случайным числом, подчиняющимся этому закону распределения вероятности.

Порядок выполнения измерений:

1) все значения x_i , переводятся в показания X_i , ($X_i = x_i[Q]$), в которые вносятся поправки Θ_i ($Q_i = X_i + \Theta_i$);

2) вычисляется оценка среднего арифметического \bar{Q}_n ;

3) находят стандартное отклонение среднего арифметического s_Q ;

4) полученный массив экспериментальных данных может содержать ошибки. Исключение ошибок проводится по правилу 3 σ : если при многократном измерении одной и той же физической ве-

личины постоянного размера, сомнительное значение результата измерения отличается от среднего больше чем на $3\sigma_Q$, то с вероятностью 0,997 оно является ошибочным и его следует отбросить.

Если в процессе проверки массива данных на ошибки некоторые значения были отброшены, следует вновь рассчитать окончательные значения среднего арифметического \bar{Q}_n и стандартное отклонение s_Q ;

5) находят среднее квадратичное отклонение среднего арифметического значения по формуле: $s_{\bar{Q}} = \frac{s_Q}{\sqrt{n}}$;

6) выбирается доверительная вероятность P и по графику функции Лапласа (при большом числе экспериментальных данных $n > 40$), или по критерию Стьюдента (при числе экспериментальных данных $n < 40$) определяется соответствующее ей значение параметра t ;

7) с выбранной доверительной вероятностью значение измеряемой величины Q не отличается от среднего значения результата измерения больше, чем на половину доверительного интервала $\varepsilon \approx t \cdot s_{\bar{Q}}$

При совсем незначительном количестве экспериментальных данных $n < (10-15)$ и принятой гипотезе о нормальности закона распределения выявление ошибок по правилу 3σ не проводится. Остальной порядок не отличается от предыдущего.

При небольшом числе измерений вместо функции Лапласа пользуются законом Стьюдента.

4.4. Определение доверительных границ систематической погрешности измерений

Неисключенная системная погрешность результата измерения образуется из составляющих, в качестве которых могут быть неисключенные систематические погрешности метода, средств измерения и т.д.

Поправки для неисключенной системной погрешности обычно вводятся в результат наблюдений. Если во всех результатах наблюдений она постоянна, то допускается исключить ее после вычисления среднего арифметического неисправленных результатов измерения.

В качестве границ, составляющих неисключенную систематическую погрешность, принимают пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, если случайные составляющие малы. При суммировании составляющих неисключенной систематической погрешности результата измерения, погрешности средств измерения каждого типа и погрешности поправок рассматривают как случайные величины.

Если нет данных о законе распределения случайных величин, их распределение принимают равномерным.

При равномерном законе распределения неисключенных систематических погрешностей (метода средств измерений и других), границы неисключенной погрешности определяются по формуле:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \Theta_i^2},$$

где Θ_i – границы i -ой неисключенной систематической погрешности; k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью.

Если $P=0,9$, то $k=0,95$;

$P=0,95$, то $k=1,1$;

$P=0,99$, то $k=1,4$.

4.5. Определение границ суммарной погрешности измерения

После определения доверительных границ случайных и систематических составляющих погрешностей результата измерения находятся границы суммарной погрешности результата измерения.

1. Если $\frac{\theta}{s_{\hat{\theta}}} < 0,8$, то неисключенной систематической погрешностью пренебрегают. В качестве границ суммарной погрешности результата измерения принимают доверительную границу случайной составляющей Δx_{θ} .

2. Если $\frac{\theta}{s_{\hat{\theta}}} > 8$, то пренебрегают случайной составляющей погрешности и принимают границу суммарной погрешности измерения равной Θ .

3. Если $0,8 \leq \frac{\theta}{s_{\hat{\theta}}} < 8$, то вычисляют оценку среднего квадратичного отклонения по формуле:

$$s_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3} + s_{\hat{\theta}}^2}, k_{\Sigma} = \frac{\Delta x_{\Sigma} + \theta}{s_{\hat{\theta}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i^3}{3}}}$$

Граница суммарной погрешности вычисляется по формуле:
 $\Delta x_{\Sigma} = k_{\Sigma} s_{\Sigma}$.

Результат измерений, полученный при обработке результатов наблюдений, содержащий систематические и случайные составляющие погрешности записывается по ГОСТу: $X = \bar{X} \pm \Delta x_{\Sigma}$.

4.6. Повышение качества измерений

Под качеством измерений понимают совокупность свойств, обуславливающих получение результатов этих измерений с требуемыми точностными характеристиками, в необходимом виде и установленные сроки.

Качество измерений характеризуется, прежде всего, такими показателями, как точность (погрешность), правильность и достоверность.

В практике использования измерений очень важным показателем становится их точность, которая представляет собой ту степень

близости итогов измерения к некоторому действительному значению, которая используется для качественного сравнения измерительных операций. В качестве количественной оценки, как правило, используется погрешность измерений. Причем чем погрешность меньше, тем считается выше точность.

Точность результата измерений – основная характеристика качества измерений, отражающая близость к нулю погрешности этого результата.

Измерение можно считать законченным, если с наибольшей точностью найден не только результат измерения, но и проведена оценка его погрешности, т. е. качество результатов измерений принято характеризовать, указывая их точность или погрешности.

Согласно закону теории погрешностей, если необходимо повысить точность результата (при исключенной систематической погрешности) в 2 раза, то число измерений необходимо увеличить в 4 раза; если требуется увеличить точность в 3 раза, то число измерений увеличивают в 9 раз и т. д.

Процесс оценки погрешности измерений считается одним из важнейших мероприятий в вопросе обеспечения единства измерений.

Обычно систематическую погрешность пытаются исключить возможными способами (например, применением методов измерения, снижающих вероятность ее возникновения), если же систематическую погрешность невозможно исключить, то ее просчитывают до начала измерений и в результат измерения вносятся соответствующие поправки. В процессе нормирования систематической погрешности определяются границы ее допустимых значений. Систематическая погрешность определяет правильность измерений средств измерения (метрологическое свойство).

Систематические погрешности в ряде случаев можно определить экспериментальным путем. Результат измерений тогда можно

уточнить посредством введения поправки. Способы исключения систематических погрешностей делятся на четыре вида:

- 1) ликвидация причин и источников погрешностей до начала проведения измерений;
- 2) устранение погрешностей в процессе уже начатого измерения способами замещения, компенсации погрешностей по знаку, противопоставлениям, симметричных наблюдений;
- 3) корректировка результатов измерения посредством внесения поправки (устранение погрешности путем вычислений);
- 4) определение пределов систематической погрешности в случае, если ее нельзя устранить.

Ликвидация причин и источников погрешностей до начала проведения измерений. Данный способ является самым оптимальным вариантом, так как его использование упрощает дальнейший ход измерений (нет необходимости исключать погрешности в процессе уже начатого измерения или вносить поправки в полученный результат).

4.7. Обработка результатов нескольких серий измерений

Иногда многократное измерение одной и той же величины постоянного размера проводится в несколько этапов разными людьми в разных условиях в разном месте и времени. Результаты такого измерения могут отличаться своими статическими характеристиками.

Серии называются однородными, если они подчиняются одному и тому же закону распределения вероятностей. В противном случае – неоднородные.

Проверка однородности является обязательной при выборе способа совместной обработки: сравниваются между собой среднее арифметическое и оценки дисперсии. Различие между средним

арифметическими \bar{Q}_I и \bar{Q}_{II} в 2-х разных сериях может быть случайным, со средним значением равным нулю и дисперсией $S_{\bar{Q}_I - \bar{Q}_{II}}^2 = \frac{s_{\bar{Q}_I}^2}{n_I} + \frac{s_{\bar{Q}_{II}}^2}{n_{II}}$.

Если экспериментальные данные в каждой серии подчиняются нормальному закону распределения, то при большой серии экспериментов $n_{I,II} > 40$, нормальному закону и подчиняются средние арифметические и их разность $G = \bar{Q}_{II} - \bar{Q}_I$.

При небольшом числе экспериментов среднее арифметическое в каждой серии подчиняется закону распределения Стьюдента, но их разность, при $n_I + n_{II} > 40$, подчиняются нормальному закону распределения. Поэтому, задавшись доверительной вероятностью Р и определив по соответствующей кривой Т, находим доверительные границы, за пределами которых не может находиться $G = \bar{Q}_{II} - \bar{Q}_I$, если она случайна.

Помимо выяснения значимости расхождения между средними арифметическими проверка однородности включает с равной оценкой их дисперсии.

Серии с незначимым различием оценок дисперсий называется равнорассеиванием. С существенным различием – неравнорассеивание.

В процессе вычислений образуется отношение ψ , вероятность которого больше 1. Если это число случайное и подчиняется распределению Фишера. Поэтому, выбрав значения интегральной функции распределения вероятностей Фишера равные вероятности Р, с которой принимается решение, можно проверить больше или меньше значение ее аргумента ψ_0 вычисленного значения ψ .

Если $\psi \leq \psi_0$, то различия оценок дисперсий случайны и гипотезу о равномерности серий считать принятой.

Равнорасеянные серии с незначимым различием между средними арифметическими считаются однородными.

Если входящие в серию данные, получены в одних и тех условиях, то это говорит о сходимости измерений. Если в разных – о воспроизводимости. Если серии неоднородны, о них говорят, что они не сходятся, но все равно пытаются использовать значения из разных серий.

Экспериментальные данные, входящие в однородные серии можно обрабатывать как единый массив.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Единство измерения

Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) – комплекс установленных стандартами взаимосвязанных правил, положений, требований и норм, определяющих организацию и методику проведения работ по оценке и обеспечению точности измерений.

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

Правовой основой обеспечения единства измерений служит законодательная метрология, которая представляет собой свод государственных актов и нормативно-технических документов различного уровня, регламентирующих метрологические правила, требования и нормы.

Технической основой ГСИ являются:

- система (совокупность) государственных эталонов единиц и шкал физических величин – эталонная база страны;
- система передачи размеров единиц и шкал физических величин от эталонов ко всем СИ с помощью эталонов и других средств поверки;
- система разработки, постановки на производство и выпуска в обращение рабочих СИ, обеспечивающих исследования, разработки, определение с требуемой точностью характеристик продукции, технологических процессов и других объектов;
- система государственных испытаний СИ (утверждение типа СИ), предназначенных для серийного или массового производства и ввоза из-за границы партиями;
- система государственной и ведомственной метрологической аттестации, поверки и калибровки СИ;

– система стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов;

– система стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов – это образцы веществ и материалов, химический состав или физические свойства которых типичны для данной группы веществ (материалов), определены с необходимой точностью, отличаются высоким постоянством и удостоверены сертификатом. Они играют важную роль в обеспечении единства измерений.

Стандартные образцы используются для градуировки, поверки и калибровки химического состава и различных свойств материалов (механических, теплофизических, оптических и др.). Они могут применяться непосредственно для контроля качества сырья и промышленной продукции путем сличения. По существу, стандартные образцы служат для поддержания единства измерений, т. е. являются средствами измерений.

Стандартные образцы подвергаются специальным испытаниям, по результатам которых они получают свидетельства (сертификат) и вносятся в государственный реестр стандартных образцов, а он в свою очередь является составной частью (разделом) Государственного реестра средств измерений.

Образцы состава и образцы свойств, в зависимости от уровня утверждения, подразделяются на государственные, отраслевые и предприятий.

В России действует Государственная служба стандартных образцов (ГССО) в составе НПО ВНИИМ имени Д. И. Менделеева.

Правильность и точность заложенной в средства измерений информации о размере единиц устанавливается при утверждении типа средств измерений. Сохранность этой информации контролируется при первичной и всех последующих поверках средств измерений.

5.2. Поверочные схемы

Основные единицы (секунда, метр, килограмм, кельвин, кандела, ампер и моль) воспроизводятся только централизованно.

Эталон единицы величины — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы величины (или кратных либо дольных значений единицы величины) в целях передачи ее размера другим средствам измерений данной величины.

От эталона единица величины передается разрядным эталонам, от них — рабочим средствам измерений.

Эталоны классифицируют на первичные, вторичные и рабочие.

Первичный эталон — эталон, воспроизводящий единицу физической величины с наивысшей точностью, возможной в данной области измерений на современном уровне научно-технических достижений. Первичный эталон может быть национальным (государственным) и международным.

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

Международные эталоны хранит и поддерживает Международное бюро мер и весов (МБМВ). Важнейшая задача деятельности МБМВ состоит в систематических международных сличениях национальных эталонов крупнейших метрологических лабораторий разных стран с международными эталонами, а также между собой, что необходимо для обеспечения достоверности, точности и единства измерений как одного из условий международных экономических связей.

Сличению подлежат как эталоны основных величин системы SI, так и производных. Установлены определенные периоды сличения. Например, эталоны метра и килограмма сличают каждые 25 лет, а электрические и световые эталоны — один раз в 3 года.

Первичному эталону соподчинены вторичные и рабочие (разрядные) эталоны. Размер воспроизводимой единицы с помощью вторичного эталона сличается с государственным эталоном.

Вторичные эталоны (их иногда называют «эталон-копии») могут утверждаться либо Госстандартом РФ, либо государственными научными метрологическими центрами, что связано с особенностями их использования.

Рабочие эталоны воспринимают размер единицы от вторичных эталонов и в свою очередь служат для передачи размера менее точному рабочему эталону (или эталону более низкого разряда) и рабочим средствам измерений.

Каждый эталон состоит из воспроизводящей части и приспособлений или устройств, обеспечивающих съём и передачу информации о размере единицы.

Использование для градуировки, аттестации и поверки средств измерений непосредственно государственных эталонов не допускается. Такие эталоны являются национальным достоянием, ценностями особой государственной важности.

По государственным эталонам устанавливаются значения физических величин вторичных эталонов. Среди вторичных эталонов различают:

- эталоны-свидетели, предназначенные для проверки сохранности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты;
- эталоны сравнения, применяемые для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом;
- эталоны-копии, используемые для передачи информации о размере рабочим эталонам.

На рис. 3 приведен один из вариантов схемы передачи информации о размере единицы от государственного эталона к средствам

измерений, из которой видно, что от вторичных эталонов информацию о размере единицы получают нижестоящие эталоны (1, 2, 3 и 4-го разрядов) и рабочие средства измерений.

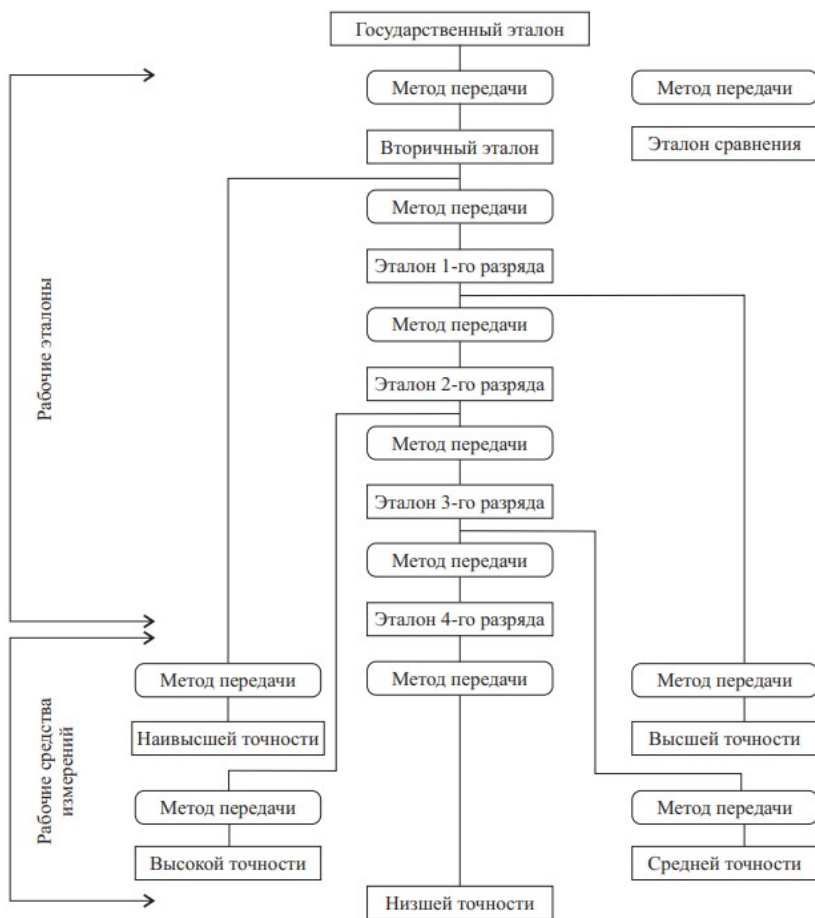


Рис. 3. Государственная поверочная схема

Не допускается использование рабочих средств измерений для передачи информации о размере единицы другим средствам

измерений. Количество ступеней от рабочего эталона до средства измерений зависит от требуемой точности передачи размера единицы и особенностей данной единицы. Известно, что на каждой ступени передачи информации точность теряется в 3–5 раз (иногда в 1,25–10 раз).

Таким образом, при многоступенчатой передаче эталонная точность не доходит до потребителя. Поэтому для высокоточных средств измерений число ступеней может быть сокращено вплоть до передачи им информации о размере единицы непосредственно от эталона-копии.

Поверочные схемы в зависимости от области распространения подразделяются на:

- межгосударственные поверочные схемы;
- государственные поверочные схемы;
- локальные поверочные схемы.

Государственная поверочная схема устанавливает передачу информации о размере единицы в масштабах страны. Она возглавляется государственными или специальными эталонами.

Локальные поверочные схемы предназначены для метрологических служб министерств (ведомств) и юридических лиц. Все локальные поверочные схемы должны соответствовать требованиям соподчиненности, которая определена государственной поверочной схемой.

Государственные поверочные схемы разрабатываются научно-исследовательскими институтами Госстандарта РФ, держателями государственных эталонов. Локальная поверочная схема уточняет требования государственной схемы применительно к специфике данного ведомства. Она возглавляется рабочими эталонами.

Государственные поверочные схемы утверждаются Госстандартом РФ, а локальные ведомственными метрологическими – службами или руководством предприятия.

Рассмотрим в общем виде содержание государственной поверочной схемы. Наименование эталонов и рабочих средств измерений обычно располагают в прямоугольниках (для государственного эталона прямоугольник двухконтурный). Здесь же указывают метрологические характеристики для данной ступени схемы. В нижней части схемы расположены рабочие средства измерений, которые, в зависимости от их степени точности (т. е. погрешности измерений), подразделяют на пять категорий: наивысшей точности; высшей; высокой; средней; низшей.

Наивысшая точность обычно соизмерима со степенью погрешности средства измерения государственного эталона. В каждой ступени поверочной схемы регламентируется порядок (метод) передачи размера единицы. Наименования методов поверки (калибровки) располагаются в овалах, в которых также указывается допускаемая погрешность метода поверки (калибровки).

Документы на государственную поверочную схему должны состоять из чертежа поверочной схемы и текстовой части, содержащей пояснения к чертежу.

Локальные поверочные схемы разрабатывают метрологические службы предприятий (организаций, министерств, ведомств, республик и т.д.) или другие организации, которым это поручено. Они утверждаются в качестве нормативно-технического или методического документа предприятия (организации, министерства, ведомства, республики и т.д.). Локальная поверочная схема должна быть согласована с предприятием (организацией), осуществляющим поверку исходного эталона, возглавляющего эту схему.

Локальные поверочные схемы оформляют в виде чертежа. Допускается дополнять чертеж текстовой частью.

Передачу размера единицы сверху вниз изображают сплошными линиями, соединяющими объекты поверки с соответствующими средствами поверки. В разрыв этих линий помещают овалы с

указанием методов передачи размера единиц. Овалы располагают в разрывах штриховых линий, разделяющих соответствующие поля схемы.

Текстовая часть поверочной схемы должна состоять из вводной части и пояснений к элементам поверочной схемы, несущих дополнительную информацию.

5.3. Поверка средств измерения

Поверка средств измерений — совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям.

Средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, до ввода в эксплуатацию, а также после ремонта подлежат первичной поверке, а в процессе эксплуатации — периодической поверке. Применяющие средства измерений в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели обязаны своевременно представлять эти средства измерений на поверку.

Правилами установлено, что поверку средств измерений осуществляют органы государственной метрологической службы (ГМС), государственные научные метрологические центры (ГНМЦ), а также аккредитованные метрологические службы юридических лиц.

Поверка проводится физическим лицом, аттестованным в качестве поверителя в соответствии с правилами, по нормативным документам, подписываемым по результатам испытаний для утверждения типа.

При положительных результатах поверки на СИ наносится знак поверительного клейма и/или выдается свидетельство – сертификат о поверке. У непригодных СИ аннулируется сертификат и оттиск поверительного клейма и выдается свидетельство о непригодности.

Конструкция средства измерений должна обеспечивать возможность нанесения знака поверки в месте, доступном для просмотра. Если особенности конструкции или условия эксплуатации средства измерений не позволяют нанести знак поверки непосредственно на средство измерений, он наносится на свидетельство о поверке.

Порядок проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке устанавливаются федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в области обеспечения единства измерений.

Сведения о результатах поверки средств измерений, предназначенных для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, передаются в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений проводящими поверку средств измерений юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями.

Средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут подвергаться поверке в добровольном порядке.

Средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут подвергаться поверке в добровольном порядке.

Существуют следующие виды поверок.

Первичная поверка проводится для средств измерений утвержденных типов при выпуске их из производства, после ремонта, при ввозе из-за границы. При утверждении типа средств измерений единичного производства, на каждое из них оформляется сертификат об утверждении типа; первичную поверку данные средства измерений не проходят.

Периодическая поверка осуществляется для средств измерений, находящихся в эксплуатации, через определенные межповерочные интервалы. Необходимость поверки обусловлена возможностью утраты измерительным средством метрологических показателей из-за временных и других воздействий. Периодичность поверки зависит от временной нестабильности метрологических характеристик (метрологической надежности), интенсивности эксплуатации и важности результатов, получаемых с помощью средств измерений.

Внеочередная поверка проводится:

- при необходимости подтверждения пригодности средства измерений к применению; применения средства измерений в качестве комплектующего по истечении половины межповерочного интервала;

- повреждении клейма или утере свидетельства о поверке;

- вводе в эксплуатацию после длительной консервации (более одного межповерочного интервала);

- отправке средств измерений потребителю после истечения половины межповерочного интервала.

Экспертная поверка проводится при возникновении разногласий по вопросам, относящимся к метрологическим характеристикам, исправности средств измерений и пригодности их к применению.

Инспекционная поверка проводится при метрологической ревизии и осуществляется метрологической службой.

Все поверочные измерения выполняются при нормальных условиях, которые регламентированы ГОСТ 8.395-80. Нормальные условия при поверке. Общие требования.

Поверка является одним из звеньев передачи размера единицы от эталона к рабочим СИ.

Органом государственной метрологической службы проводится аккредитация организации на право проведения поверки. Порядок аккредитации установлен Госстандартом. Поверку проводят

лица, аттестованные в качестве поверителей в органе государственной метрологической службы.

Проверка подразделяется на три части:

- метрологическую;
- техническую;
- административную.

При метрологической устанавливают:

- основную погрешность прибора;
- стабильность, повторяемость, дрейф;
- чувствительность к экстремальным помехам;
- разрешающую способность считывающих устройств.

При технической проверке осуществляют проверку общего состояния СИ: обнаружение грязи, износа, правильности установки СИ, оценку возможности получения неправильных измерений в следствие умышленного неправильного использования.

При административной проверке проверяется наличие знака поверительного клейма или сертификата о проверке, даты первоначальной поверки, целостность клейм, замков и других устройств, наличие документов (протоколов, поверки, ремонта).

Органы государственной метрологической службы обязаны учитывать результаты последних проверок и разрабатывать рекомендации по корректировке межповерочного интервала.

Результатом проверки является подтверждение пригодности СИ к применению в сферах, подлежащих государственному метрологическому контролю или признание СИ непригодным.

Органы государственной метрологической службы должны обеспечивать контроль поверочного процесса. При контроле проверяют:

- правила и методику проведения поверки;
- персонал, проводящий поверки;
- эталоны и вспомогательное оборудование;
- межповерочные интервалы;

- время и место проведения поверки и т.д.

По результатам анализа данных протокола поверки органы государственной метрологической службы и юридические лица, проводящие поверку, могут:

- требовать изменения утвержденного типа, ограничения применения типа и аннулирование утверждения типа;
- информировать с согласия организаций, проводящих утверждение типа пользователя о необходимости внесения определенных изменений в методику поверки;
- предложить или приказать пользователю изменить процедуру обслуживания, область применения, межповерочный интервал, окружающие условия, обслуживающий персонал или произвести серийную подстройку прибора;
- повысить требования к юридическим лицам, проводящим поверку или ремонт, а также требовать совершенствование данных работ, если они хотят продлить срок действия лицензии или аттестата аккредитования;
- требовать введения протокола поверки для тех типов СИ, для которых методиками они не предусмотрены.

В последние годы в связи с переходом к рынку возникли новые формы метрологической деятельности, одна из них – российская система калибровки.

5.4. Калибровка средств измерения

Контроль средств измерений на предмет их пригодности к применению в мировой практике осуществляется поверкой и калибровкой.

Калибровка средства измерений — это совокупность операций, выполняемых калибровочной лабораторией для определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности средства измерений к применению в сфе-

рах, не подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору в соответствии с установленными требованиями. Результаты калибровки средств измерений удостоверяют калибровочным знаком, наносимым на средства измерений, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах.

Поверку (обязательная госповерка) может выполнять, как правило, орган государственной метрологической службы, а калибровку — любая аккредитованная и неаккредитованная организация.

Поверка обязательна для средств измерений, применяемых в сферах, подлежащих Государственному метрологическому контролю, калибровка же — процедура добровольная, поскольку относится к средствам измерений, не подлежащим ГМК.

Освободившись от государственного контроля, предприятия попадают под не менее жесткий контроль рынка. Это означает, что свобода выбора предприятия по «метрологическому поведению» является относительной, всё равно необходимо соблюдать метрологические правила. В развитых странах устанавливает и контролирует исполнение этих правил негосударственная организация, именуемая национальной калибровочной службой. Она берет на себя функции регулирования и разрешения вопросов, связанных со средствами измерений, не подпадающими под контроль государственных метрологических служб. Желание иметь конкурентоспособную продукцию побуждает предприятия иметь измерительные средства, дающие достоверные результаты.

Участие в сертификации систем качества, регламентируемых стандартами серии ИСО 9000, стимулирует развитие измерительных средств предприятия. Это согласуется с требованиями систем качества, регламентируемыми стандартами ИСО серии 9000.

Построение Российской системы калибровки основывается на следующих принципах:

- добровольности вступления;

- обязательности получения размеров единиц от государственных эталонов;
- профессионализме и компетентности персонала;
- самокупаемости и самофинансирования.

Основное звено Российской системы калибровки— калибровочная лаборатория. Она представляет собой самостоятельное предприятие или подразделение в составе метрологической службы предприятия, которое может осуществлять калибровку средств измерений для собственных нужд или для сторонних организаций. Если калибровка проводится для сторонних организаций, то калибровочная лаборатория должна быть аккредитована органом Российской системы калибровки. Аккредитацию осуществляют государственные научные метрологические центры или органы Государственной метрологической службы в соответствии со своей компетенцией и требованиями, установленными ПР 50.2.018–95 ГСИ «Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право проведения калибровочных работ».

5.5. Нестандартные средства измерений

Установлен порядок метрологического обеспечения эксплуатации нестандартных средств измерений, который распространяется также:

- на ввозимые из-за границы единичными экземплярами;
- единичные экземпляры серийных средств измерений, отличающиеся от условий, для которых нормированы их метрологические характеристики;
- серийно выпускаемые образцы, в схему и конструкцию которых внесены изменения, влияющие на их метрологические характеристики.

Задачами метрологического обеспечения НСИ являются:

- исследование метрологических характеристик и установление соответствия нестандартных средств измерения требованиям технических заданий либо паспорту (проекту) завода-изготовителя;
- установление рациональной номенклатуры нестандартных средств измерения;
- обеспечение нестандартных средств измерения средствами аттестации, поверки при их разработке, изготовлении и эксплуатации;
- обеспечение постоянной пригодности нестандартных средств измерения к применению по назначению с нормированной для них точностью;
- сокращение сроков и снижение затрат на разработку, изготовление и эксплуатацию.

Научно-методическое руководство деятельностью предприятий по метрологическому обеспечению нестандартных средств измерения осуществляют головные и базовые организации метрологической службы министерств (ведомств), метрологические институты, центры стандартизации и метрологии Госстандарта России. Вновь разработанные или закупленные по импорту нестандартных средств измерения допускаются к применению только после их метрологической аттестации. Если существует договор о взаимном признании результатов аттестации средств измерений со страной, из которой импортируется нестандартных средств измерения, то аттестация в России может не проводиться.

За разработкой, изготовлением и эксплуатацией нестандартных средств измерения ведется авторский и государственный (в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора) надзор, а также ведомственный контроль.

Авторский контроль осуществляется разработчиком нестандартных средств измерения совместно с метрологической службой разработчика. Он предусматривает участие в подготовке и проведении метрологической аттестации нестандартных средств измерения, оказание помощи при разработке нормативно-технической документации и организации поверки нестандартных средств измерения.

Ведомственный метрологический контроль за разработкой, изготовлением, аттестацией и поверкой нестандартных средств измерения проводится метрологическими службами министерства (ведомства).

6. ГОСУДАРСТВЕННАЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА РФ

6.1 Состав и основные задачи

Государственной метрологической службы

В настоящее время вся метрологическая деятельность в Российской Федерации основывается на конституционной норме, которая закрепляет централизованное руководство основными вопросами законодательной метрологии. В развитие этой конституционной нормы приняты законы «Об обеспечении единства измерений» и «О техническом регулировании», детализирующие основы метрологической деятельности. По закону РФ «Об обеспечении единства измерений» Государственная метрологическая служба находится в ведении Госстандарта России и включает:

- государственные научные метрологические центры;
- органы Государственной метрологической службы на территории республик, автономных областей, округов, краев и областей Российской Федерации.

Госстандарт России осуществляет управление деятельностью по обеспечению единства измерений в Российской Федерации и выполняет следующие функции:

- межрегиональную и межотраслевую координацию деятельности по обеспечению единства измерений в Российской Федерации;
- представление Правительству Российской Федерации предложений по единицам величин, допускаемым к применению;
- осуществление государственного метрологического контроля и надзора;
- осуществление контроля за соблюдением условий международных договоров Российской Федерации о признании результатов испытаний и поверки средств измерений;

- установление правил создания, утверждения, хранения и применения эталонов единиц величин;
- определение общих метрологических требований к средствам, методам и результатам измерений;
- руководство деятельностью Государственной метрологической службы и иных государственных служб обеспечения единства измерений;
- участие в деятельности международных организаций по вопросам обеспечения единства измерений.

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

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

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

Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов осуществляет межрегиональную и межотраслевую координацию работ по разработке и внедрению стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов в науке и

технике для обеспечения единства измерений на основе их применения.

В состав Государственной метрологической службы входят государственные научные метрологические центры, Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС), научно-исследовательские институты и территориальные центры стандартизации и метрологии. Важнейшими направлениями деятельности ВНИИМС являются общее научно-методическое руководство и координация деятельности метрологических служб, а также разработка научно-методических, организационных, технико-экономических и правовых основ метрологического обеспечения народного хозяйства.

Научные центры являются держателями государственных эталонов, а также проводят исследования по теории измерений, принципам и методам высокоточных измерений. Среди научных центров наиболее крупными являются:

- НПО ВНИИ метрологии имени Д. И. Менделеева (ВНИИМ, Санкт-Петербург), который специализируется на величинах длины и массы, а также механических, теплофизических, электрических, магнитных величинах, ионизирующих излучениях, давлении, физико-химическом составе и свойствах веществ;

- НПО ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, Московская область), который занимается эталонами радиотехнических и магнитных величин, времени и частоты, акустических и гидроакустических величин, а также низких температур, твердости и др.;

- Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ, Екатеринбург) — руководит исследованиями по стандартным образцам состава и свойств веществ и материалов;

– Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии (СНИИМ, Новосибирск), который занимается радиотехническими, электрическими и магнитными величинами;

– ВНИИМС — специализируется на геометрических и электрических величинах, давлении, параметрах электромагнитной совместимости.

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

Основными задачами государственных региональных центров метрологии являются:

- совершенствование, содержание и применение государственных эталонов единиц величин, используемых для обеспечения прослеживаемости;

- участие в оказании государственных услуг по обеспечению единства измерений в соответствии с областью аккредитации;

- проведение поверки средств измерений, входящих в перечень средств измерений, поверка которых осуществляется только аккредитованными в области обеспечения единства измерений государственными региональными центрами метрологии, а также других средств измерений в соответствии с установленной областью аккредитации;

- передача единиц величин от государственных эталонов единиц величин.

Органы государственной метрологической службы осуществляют государственный метрологический контроль и надзор на территориях субъектов РФ.

Метрологические службы организуются и на предприятиях. Их основными задачами является следующие:

- обеспечение надлежащего состояния мер и измерительных приборов, применяемых на предприятии;
- проведение надзора за состоянием и правильным применением измерительной и испытательной техники во всех подразделениях предприятия;
- систематическое изучение эксплуатационных качеств измерительной аппаратуры, установление надежности ее работы и оптимальных сроков периодической поверки;
- активное участие в вопросах выбора и назначения средств измерений, испытаний и внедрения новой прогрессивной измерительной техники, связанной с повышением качества выпускаемой продукции.

В состав метрологических служб предприятий и организаций могут входить самостоятельные калибровочные лаборатории, а также структурные подразделения по ремонту средств измерений.

6.2. Государственный метрологический контроль и надзор

В соответствии с законом РФ «Об обеспечении единства измерений» Государственный метрологический контроль и надзор, осуществляемые с целью проверить соблюдение метрологических правил и норм, распространяются на следующие сферы:

- здравоохранение, ветеринарию, охрану окружающей среды, обеспечение безопасности труда;
- торговые операции и взаимные расчеты между покупателем и продавцом, в т. ч. на операции с применением игровых автоматов и устройств;
- государственные учетные операции;
- обеспечение обороны государства;
- геодезические и гидрометеорологические работы;
- банковские, налоговые, таможенные и почтовые операции;

– производство продукции, поставляемой по контрактам для государственных нужд в соответствии с законодательством Российской Федерации;

– испытания и контроль качества продукции для определения соответствия обязательным требованиям государственных стандартов Российской Федерации;

– обязательной сертификации продукции и услуг;

– измерений, проводимых по поручению органов суда, прокуратуры, арбитражного суда, государственных органов управления Российской Федерации;

– регистрацию национальных и международных спортивных рекордов.

Метрологический контроль и надзор метрологическими службами юридических лиц осуществляются путем:

– калибровки средств измерений;

– надзора за состоянием и применением средств измерений (аттестованными для выполнения измерений), эталонами единиц величин (применяемыми для калибровки средств измерений), соблюдением метрологических правил и норм нормативных документов по обеспечению единства измерений;

– выдачи обязательных предписаний, направленных на предотвращение, прекращение или устранение нарушений метрологических правил и норм;

– проверки своевременности представления средств измерений на испытания в целях утверждения типа средств измерений, а также на поверку и калибровку.

Государственный метрологический контроль включает:

– утверждение типа средств измерений;

– поверку средств измерений, в т. ч. эталонов;

– лицензирование деятельности юридических и физических лиц по изготовлению и ремонту средств измерений.

Испытания средств измерений для целей утверждения их типа проводятся государственными научными метрологическими центрами Госстандарта России, аккредитованными им в качестве государственных центров испытаний средств измерений.

Система испытаний и утверждения типа средств измерений включает:

- испытания средств измерений для утверждения типа;
- принятие решения об утверждении типа;
- его государственную регистрацию (внесение в реестр) и выдачу сертификата об утверждении типа;
- испытания средств измерений на соответствие утвержденному типу;
- признание утверждения типа или результатов испытаний типа, проведенных компетентными организациями зарубежных стран;
- информационное обслуживание потребителей измерительной техники, контрольно-надзорных органов и органов государственного управления.

Программа испытаний средств измерений может предусматривать только определение метрологических характеристик конкретных образцов средств измерений и экспериментальную апробацию методики поверки, что по объему работ равносильно метрологической аттестации.

На средство измерений утвержденного типа и на эксплуатационные документы, сопровождающие каждый экземпляр, наносится знак утверждения типа средств измерений установленной формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батрак, А.П. Метрология. Версия 1.0: учебное пособие / А.П. Батрак, В.А. Титов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 1 DVD. – Загл. с титул. экрана. – Текст. Изображение: электронные.

2. Земляной, К.Г. Метрология, стандартизация и сертификация: учебное пособие / К.Г. Земляной, А.Э. Глызина. – Министерство науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2022. – 235 с. – Текст. Изображение: непосредственные.

3. Шишкин, И.Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством: учебник для вузов / Под ред. акад. Н.С. Соломенко. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 342 с. – Текст: Изображение: непосредственные.

4. Правиков, Ю.М. Метрологическое обеспечение производства: учебное пособие / Ю.М. Правиков, Г.Р. Муслина – М.: КНОРУС, 2009. – 240 с. – Текст: Изображение: непосредственные.

Учебное издание

*Докукина Ирина Александровна
Савич Екатерина Константиновна
Антипов Дмитрий Вячеславович*

МЕТРОЛОГИЯ

Учебное пособие

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 20.06 2023. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 4,75

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1-27). Заказ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.