

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

1. Физические величины, методы и средства измерений.

1.1. Основные понятия метрологии

Метрология — наука об измерениях физических величин, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности (ГОСТ 16263—70).

Предметом метрологии является получение количественной информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью.

Главные задачи метрологии — установление единиц физических величин и признание их законности, обеспечение единства измерений, разработка систем воспроизведения единиц и передача их размеров рабочим средствам измерений.

Физическая величина — одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Единица физической величины — это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице.

Различают *истинное* значение физической величины, идеально отражающее свойство объекта, и *действительное* — найденное экспериментально, достаточно близкое к истинному значению физической величины.

Постулаты теории измерений.

Основной постулат метрологии: результат измерения является случайным числом.

В развернутом виде основной постулат записывается рядом положений.

Первый постулат: в рамках принятой модели объекта исследований существует определённая измеряемая величина и её истинное значение.

Второй постулат: истинное значение измеряемой величины постоянно.

Третий постулат: существует несоответствие измеряемой величины исследуемому свойству объекта. Истинное значение физической величины отыскать невозможно.

Поскольку истинное значение физической величины неизвестно, то в метрологических работах вместо истинного значения используют действительное, за которое принимают обычно показание эталонов.

Измерением называют совокупность операций, выполняемых с помощью технического средства, хранящего единицу физической величины и позволяющего сопоставить с ней измеряемую величину. В результате измерения получают значение физической величины

$$Q = X \cdot [Q], \quad (1.1)$$

где X — числовое значение физической величины в принятых единицах; $[Q]$ — единица физической величины. Уравнение (1.1) называют *основным уравнением измерения*.

Контроль - определение соответствия измеренного значения физической величины установленным значениям.

Одной из важнейших задач метрологии является обеспечение единства измерений (ОЕИ).

Единство измерений — состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах, а погрешности известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы. Единство измерений необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разных местах, в разное время, с использованием разных методов и средств измерений.

Объектом измерений являются физические величины, которые принято делить на основные и производные. Основные величины независимы друг от друга, но они могут служить основой для установления связей с другими физическими величинами, которые называют производными от них. Например, в законе Ньютона $F=ma$ масса (m) — основная физическая величина, а сила (F) — это производная величина, зависящая от массы и ускорения. Основным величинам соответствуют основные единицы измерений, а производным - производные единицы измерений.

Совокупность основных и производных единиц называется *системой единиц физических величин*.

1.2 Физические величины

Свойства физических объектов проявляются в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности.

Отношение эквивалентности — это отношение, в котором данное свойство у различных объектов оказывается одинаковым или неодинаковым.

Отношение порядка — это отношение, в котором данное свойство у различных объектов оказывается больше или меньше:

Отношение аддитивности — это отношение, в котором однородные свойства различных объектов могут суммироваться.

В зависимости от проявлений свойств физических объектов в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности, можно выделить четыре группы физических величин (в дальнейшем под термином величина будем понимать только физические величины).

К первой группе относят экстенсивные величины, для которых определены операции сложения и вычитания, то есть величины, в результате сложения которых (имеются в виду величины одного свойства) получается качественно та же самая величина. К подобным величинам относятся, например, длина, масса, сила электрического тока и т. д.

Вторая группа — это интенсивные величины, для которых определены отношения порядка и эквивалентности (больше — меньше, теплее — холоднее, одинаково теплые). Операция сложения для таких величин не имеет физического смысла. Но интервалы этих величин (разница двух размеров) относятся уже к величинам первой группы (экстенсивные величины) и для них определена операция сложения. В виде разности размеров эти величины входят в физические законы и соотношения.

Величины, относящиеся ко второй группе, имеют единицу измерения, но их шкалы не имеют естественного нуля. К числу таких величин относятся время и электрический потенциал.

К третьей группе относят величины, для которых определены только отношения порядка и эквивалентности (интенсивные величины). Существование подобных отношений устанавливается теоретически, исходя из общезначимых соображений, или экспериментально. К величинам третьей группы относят твердость, интенсивность землетрясений, силу ветра и другие величины, единицу измерений для которых ввести не удастся, но которые, тем не менее, оцениваются с помощью технических устройств по некоторому алгоритму. Единицы измерений у величин третьей группы отсутствуют.

В четвертую группу входят свойства объектов, не имеющие по тем или иным причинам количественной оценки.

Размеры величин как измеряются, так и оцениваются при помощи шкал.

Шкала физической величины — это упорядоченная совокупность значений величины, служащая исходной основой для измерений данной величины.

В зависимости от вида проявлений свойств физических объектов различают пять основных типов шкал измерений.

1.3 Типы шкал измерений.

1. Шкала наименований — это самый простой тип шкал, основанный на приписывании качественным свойствам объектов чисел или имен. Такие шкалы применяют для свойств, проявляющих себя только в отношении эквивалентности, которые у различных объектов могут совпадать или не совпадать. В таких шкалах отсутствуют понятия нуля и единицы измерения. Часто по таким шкалам классифицируют свойства, определяемые с помощью органов чувств человека (экспертные оценки).

Примерами шкал наименований могут служить атлас цветов для идентификации оттенков цвета или экспертные оценки запахов.

2. Шкалы порядка применяют для оценивания размеров величин третьей группы, которые проявляют себя в отношении эквивалентности и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления данного свойства. В этих шкалах обычно имеется понятие о нуле шкалы, но единицы измерения ввести

нельзя. Эти величины не измеряют, а оценивают по заранее выбранным правилам в порядке убывания или возрастания размера величины. Примерами шкалы порядка могут служить шкалы для определения твердости материала.

3. Шкалы интервалов применяют для измерений интервалов величин второй группы, которые, в отличие от самих величин, удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности. Ноль такой шкалы принят по соглашению и поэтому является условным. К таким шкалам относится летоисчисление по различным календарям, в которых за нулевую отметку принимается либо Рождество Христово, либо сотворение мира. К таким же шкалам относятся температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта, Реомюра.

4. Шкалы отношений являются наиболее совершенными из всех перечисленных, так как имеют не только единицу измерения, но и естественный ноль шкалы. С помощью этих шкал измеряются физические величины первой группы, для которых определены все арифметические операции: сложение, вычитание, умножение и деление, — что имеет важное значение для измерения этих величин. Примерами величин, для которых существуют шкалы отношений, являются масса, длина, термодинамическая температура, связанная со шкалой Кельвина, сила электрического тока, электрическое напряжение и т. д.

5. Абсолютные шкалы. Эти шкалы обладают всеми признаками шкал отношения, но при этом имеют безразмерную единицу измерения. Это относительные величины, такие как коэффициенты усиления, ослабления, плоский или телесный угол и т. д.

1.4 Международная система единиц

Международная система единиц (международное сокращенное наименование SI, а в русской транскрипции СИ). Решение о создании практической международной системы единиц было принято в 1948 г. на IX Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ). В 1960 г. проект Международной системы единиц, основанной на шести основных единицах, был утвержден. В 1971 г. к единицам СИ была добавлена седьмая основная единица — количество вещества — моль.

Основными единицами Международной системы являются:

1. Метр (международное обозначение m ; русское — м; размерность L) – это единица длины, равная пути, пройденному в вакууме светом за интервал времени $1/299\,792\,458$ с;

2. Килограмм (международное обозначение kg; русское — кг; размерность M) — единица массы, равная массе международного прототипа килограмма;

3. Секунда (международное обозначение s; русское — с; размерность T) — единица времени, равная $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133;

4. Ампер (международное обозначение A; русское — А; размерность I) — единица силы электрического тока. Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н;

5. Кельвин (международное обозначение K; русское — К; размерность Θ) — единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды;

6. Кандела (международное обозначение cd; русское — кд; размерность J) — единица силы света. Кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, электрическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср;

7. Моль (международное обозначение mol; русское — моль; размерность N) — единица количества вещества. Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой $0,012$ кг.

Размерность производных величин выражают через размерности основных величин: $\dim X = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} \dots$

При определении размерности производных величин руководствуются следующими правилами:

1. Размерности левой и правой частей уравнений не могут не совпадать, так как сравниваться между собой могут только одинаковые свойства. Объединяя левые и правые части уравнений, можно прийти к выводу, что алгебраически суммироваться могут только величины, имеющие одинаковые размерности.

2. Алгебра размерностей мультипликативна, то есть состоит из одного единственного действия — умножения.

- Размерность произведения нескольких величин равна произведению их размерностей. Так, если зависимость между значениями величин Q, A, B, C имеет вид $Q = A * B * C$, то $\dim Q = \dim A * \dim B * \dim C$.

- Размерность частного при делении одной величины на другую равна отношению их размерностей, то есть если $Q = A/B$, то $\dim Q = \dim A / \dim B$.

Размерность любой величины, возведенной в некоторую степень, равна такой же степени ее размерности.

В системе СИ приняты безразмерные производные единицы — радиан истерадиан.

1. Радиан (обозначение международное rad, русское — рад) — единица измерения плоского угла, равная внутреннему углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу;

2. Стерадиан (обозначение международное sr, русское — ср) — единица телесного угла. Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности этой сферы площадь, равной площади квадрата со стороной, равной радиусу.

1.5 Виды средств измерений.

Технические средства, используемые при измерениях и имеющие *нормированные метрологические свойства*, называют *средствами измерения* (СИ).

К средствам измерений относятся: меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и системы.

Меры — средства измерений, предназначенные для воспроизведения физической величины заданного размера. Различают меры однозначные (гиря 1 кг, ка-

либр); многозначные (масштабная линейка); набор мер, например, набор гирь, плоскопараллельных концевых мер длины (плиток), конденсаторов постоянной емкости и т. п.

К однозначным мерам можно отнести стандартные образцы, в качестве которых принято понимать образцы веществ и материалов, чей химический состав или физические свойства типичны для данной группы веществ или материалов, которые определены с необходимой точностью, отличаются высоким постоянством и удостоверены сертификатом.

При пользовании мерами следует учитывать номинальное и действительное значения мер, а также погрешность меры и ее разряд. Номинальным называют значение меры, указанное на ней. Действительное значение меры должно быть указано в специальном свидетельстве как результат высокоточного измерения с использованием официального эталона. Разность между номинальным и действительным значениями называется погрешностью меры. Поскольку при аттестации (поверке) мер могут быть погрешности, меры подразделяют на разряды (1-го, 2-го и т.д.) и называют разрядными эталонами, которые используют для поверки измерительных средств. Величина погрешности меры служит основой для деления мер на классы.

Измерительный преобразователь – это средство измерений, которое служит для преобразования сигнала измерительной информации в форму, удобную для обработки или хранения, а также для передачи в показывающее устройство. Измерительные преобразователи входят в состав измерительных приборов (установок, систем) или применяются вместе с каким-либо средством измерений. Первичные измерительные преобразователи служат для непосредственного (первого) восприятия измеряемой величины, как правило, неэлектрической, и преобразования ее в другую величину – электрическую. Часть первичного преобразователя, воспринимающая измерительный сигнал на его входе, называется чувствительным элементом или сенсором (например, термопара). Промежуточными измерительными преобразователями называются преобразователи, расположенные в измерительной цепи после первичного преобразователя и обычно по измеряемой (преобразуемой) физической величине однородные с ним. По характеру преобра-

зования измерительные преобразователи подразделяются на аналоговые, аналого-цифровые, цифро-аналоговые. Указанные преобразователи почти всегда являются промежуточными.

Измерительные приборы – это средства измерений, которые позволяют получать измерительную информацию в форме, удобной для восприятия пользователем. По способу отсчета значений измеряемых величин приборы подразделяются на показывающие (в том числе на аналоговые и цифровые) и регистрирующие. Регистрирующие приборы по способу записи делятся на самопишущие (запись в графическом виде) и печатающие (в числовой форме). В случае сопряжения прибора с мини-ЭВМ отсчет может производиться с помощью дисплея.

Измерительные установки – это совокупность средств измерений, объединенных по функциональному признаку со вспомогательными устройствами, для измерения одной или нескольких физических величин объекта измерений.

Измерительные системы - это средства измерений и устройства территориально разбросанные и объединенные каналами связи.

В настоящее время большинство измерительных систем являются автоматизированными. Они обеспечивают автоматизацию процессов измерений, обработки и отображения результатов измерений.

По метрологическому назначению средства измерений делят на эталоны и рабочие средства измерений.

Эталон — это средство измерений (или комплекс средств измерений), официально утвержденное и обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы физической величины с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений.

Эталон, утвержденный в качестве исходного для всей страны, называют *государственным первичным эталоном*. В целях проведения различных метрологических измерений создаются *вторичные эталоны*: эталоны-свидетели, эталоны-копии, эталоны-сравнения, рабочие эталоны.

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

Эталоны-сравнения применяются для сличения эталонов, которые по каким-либо причинам не могут непосредственно сличаться друг с другом.

Эталоны-копии используются для передачи размеров единиц рабочим эталонам.

Рабочие эталоны используются для передачи единиц величин рабочим средствам измерений.

Рабочие средства измерений - это меры, устройства или приборы, применяемые для измерений, не связанных с передачей единицы физической величины.

1.6 Поверочные схемы.

Порядок передачи размера единицы физической величины от эталона к рабочему средству измерения регламентируется поверочной схемой.

Поверочная схема для средств измерений — это нормативный документ, устанавливающий соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона рабочим средствам измерений (с указанием методов и погрешности при передаче). Различают государственные и локальные поверочные схемы.

Государственная поверочная схема распространяется на все средства измерений данной физической величины, имеющих в России. Она разрабатывается в качестве национального стандарта, не должна противоречить международным поверочным схемам.

Локальная поверочная схема распространяется на средства измерений данной физической величины, применяемые в регионе, области, ведомстве или на отдельном предприятии. Все локальные поверочные схемы составляются при наличии не менее двух ступеней передачи размера единицы физической величины и должны соответствовать требованиям соподчиненности, определяемым государственной поверочной схемой.

Поверочные схемы состоят из текстовой части и чертежа. Локальные поверочные схемы могут состоять только из чертежа. Они должны наглядно изображать систему передачи единиц измерений. В локальную поверочную схему должны быть включены значения физических величин или их диапазона, все средства

измерений и методы их поверки, основные метрологические характеристики средств измерений.

Положения о поверочных схемах, правила расчета параметров поверочных схем и оформления чертежей изложены в ГОСТ 8.061-80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение» и рекомендациях МИ-76 «Методика определения параметров поверочных схем».

Поверочные схемы составляются на существующие виды измерений и с развитием и совершенствованием измерений должны периодически пересматриваться. Новые поверочные схемы составляются на новые виды измерительной техники или новые области измерений.

Так, в соответствии с государственной поверочной схемой передача единицы величины производится от государственного первичного эталона к вторичному эталону, от него рабочим эталонам высшего разряда, от них рабочим эталонам низших разрядов, а от последних к рабочим средствам измерения.

На каждой ступени поверочной схемы точность теряется в 3 – 5 раз.

1.7 Поверка и калибровка средств измерений.

Важнейшей формой государственного регулирования в области обеспечения единства измерений является поверка средств измерений.

Поверкой называется установление органом государственной метрологической службы (или другим официально уполномоченным органом) **пригодности** средств измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждение их соответствия установленным обязательным требованиям.

Основной метрологической характеристикой, определяемой при поверке средств измерений, является их **погрешность**, которая находится путем сравнения поверяемого средства измерений с эталоном. Результаты поверки годных средств измерений оформляют выдачей *свидетельства о поверке*, нанесением *знака поверки*. Поверку проводят специалисты, аттестованные в качестве поверителей.

Для поверки измерительной техники используются исправные, более точные средства измерений, которые и передают воспроизводимый (хранимый) размер единицы соответствующей величины рабочим средствам измерений. Размер единицы физической величины передается от государственного эталона другим средствам измерений с помощью «многоэтажной» системы эталонов и рабочих измерений. Эту систему можно представить в виде пирамиды, в основании которой находится вся совокупность однородных (по ориентации на измерение соответствующей величины) рабочих средств измерений, вершину занимает государственный эталон, а на промежуточных этажах расположены эталоны 1-го, 2-го, 3-го (иногда 4-го) разрядов. Схема, изображенная на рис. 1.1, позволяет проследить последовательность передачи размера единицы и представить количественную сопоставимость эталонов различных разрядов и рабочих средств измерений. Эталоны 1-го разряда имеют большую погрешность по сравнению с государственным эталоном, поэтому стоимость их меньше, чем у эталона, и их количество может достигать от нескольких единиц до нескольких десятков единиц. То же самое можно сказать об эталонах 2-го разряда и т.д.

Процесс передачи размера единиц от эталонов рабочим средствам измерений связан с функциональным взаимодействием эталонного и рабочего средства измерений или эталона более высокого разряда с эталоном меньшего разряда (например, эталона 1-го разряда с эталоном 2-го разряда), которое происходит при поверке или калибровке средств измерений.

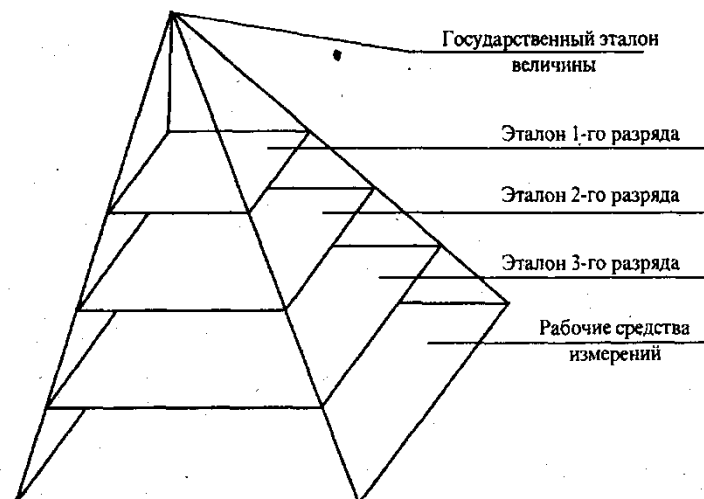


Рис.1.1. Схематическое изображение системы передачи размера единицы величины

Средства измерений могут подвергаться первичной, периодической, внеочередной, инспекционной и другим поверкам.

Первичная поверка проводится при выпуске средства измерений из производства или после ремонта.

Периодическая поверка проводится при эксплуатации и хранении средств измерений через определенные установленные межповерочные интервалы.

Инспекционная поверка осуществляется при проведении государственного метрологического надзора (инспекции).

Поверке подвергаются средства измерений, применяемые в сферах, на которые распространяется государственное регулирование в области ОЕИ.

Средства измерений, не входящие в сферу обязательного государственного регулирования ОЕИ, могут подвергаться *калибровке*.

Калибровкой устанавливается соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений, и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона, с целью определения и подтверждения действительных метрологических характеристик этого средства измерений. Таким образом, калибровка по содержанию соответствует поверке средств измерений, а по исполнению относится к деятельности калибровочных органов метрологических служб предприятий.

Если поверка является обязательной операцией, то калибровка — функция добровольная, выполняемая аккредитованной метрологической службой.

Главным общим условием для обеспечения качества результатов измерений, как при поверке, так и калибровке является обязательная передача размеров единиц от государственных эталонов при помощи рабочих эталонов, находящихся в органах государственной метрологической службы, эталонам предприятий и далее рабочим средствам измерений.

1.8 Методы поверки.

К допускаемым методам поверки (калибровки) средств измерений относятся следующие:

1. *Метод непосредственного сличения* поверяемого или калибруемого средства измерения с эталоном соответствующего разряда без использования компаратора (прибора сравнения). Этот метод широко применяется при поверке различных средств измерений, например, в области электрических и магнитных измерений при определении метрологических характеристик измерительных приборов, предназначенных для измерения силы тока, напряжения, частоты.

Основой метода является проведение одновременных измерений одного и того же значения физической величины поверяемым или калибруемым и эталонным средствами измерений. К достоинствам метода непосредственных сличений относятся простота, наглядность, возможность применения автоматической поверки (калибровки), отсутствие необходимости применения сложного оборудования.

2. *Метод сличения поверяемого или калибруемого средства измерения с однородным эталонным средством измерения с помощью компаратора.*

В некоторых случаях оказывается невозможным сравнить показания средств измерений одной и той же величины. Например, нельзя сравнить показания двух вольтметров, если один из них пригоден для измерений только в цепях постоянного тока, а другой — переменного; нельзя непосредственно сравнить размеры мер магнитных и электрических величин. Измерение этих величин выполняют путем введения в схему поверки некоторого промежуточного звена — компаратора, позволяющего косвенно сравнить две однородные или разнородные физические величины. Компаратором может быть любое средство измерения, одинаково реагирующее на сигнал как эталонного, так и поверяемого измерительного прибора. При сличении мер сопротивления, индуктивности, емкости в качестве компараторов используют мосты постоянного или переменного тока, при сличении мер сопротивления и ЭДС - потенциометры.

3. *Метод прямых измерений* применяется в случае, когда имеется возможность с помощью многозначной эталонной меры, воспроизводящей в некотором диапазоне значения величины, в единицах которой проградуировано поверяемое или калибруемое средство измерения, произвести сличение и определить погрешность испытываемого средства измерения в пределах измерений.

Метод прямых измерений часто применяется при поверке или калибровке мер электрических и магнитных величин.

Например, с помощью калибраторов постоянного электрического напряжения поверяются или калибруются вольтметры постоянного тока. В этом случае при выставлении некоторого калиброванного значения напряжения U_k , подаваемого на поверяемый прибор, определяются показание последнего U_p и погрешность $\Delta = U_p - U_k$. По существу метод прямых измерений аналогичен методу непосредственного сличения для однозначных мер.

4. *Метод косвенных измерений величины*, позволяющий находить действительный размер меры с помощью поверяемого или калибруемого средства измерения прямыми измерениями нескольких эталонных величин, связанных с искомой величиной определенной зависимостью. Метод применяется тогда, когда действительные значения величин, воспроизводимые эталонным и поверяемым средствами измерений, невозможно определить прямыми измерениями или когда косвенные измерения более просты или более точны по сравнению с прямыми измерениями.

1.9 Виды и методы измерений.

Классификации видов измерений:

- по характеристике точности;
- по способу получения информации;
- по количеству измерительной информации;
- по отношению к основным единицам;
- по характеру изменения измеряемой величины;
- по цели измерения.

По характеристике точности различают *равноточные* и *неравноточные* измерения. *Равноточные* измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности СИ и в одних и тех же условиях. *Неравноточные* измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных несколькими различными по точности СИ и (или) в нескольких разных условиях.

По способу получения информации различают *прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения*. При *прямых измерениях* значения физической величины находят из опытных данных, при *косвенных* — на основании известной зависимости от величин, подвергаемых прямым измерениям. Так, диаметр детали можно непосредственно измерить как расстояние между диаметрально противоположными точками (прямое измерение) либо определить из зависимости, связывающей этот диаметр, длину дуги и стягивающую ее хорду, измерив непосредственно последние величины (косвенное измерение). *Совокупные измерения* - измерения, в которых значения измеряемых величин находят по данным повторных измерений одной или нескольких одноименных величин при различных их сочетаниях. *Совместные измерения* – одновременные измерения двух или нескольких разноименных величин.

По количеству измерительной информации различают *однократные и многократные измерения*.

Однократные измерения – это одно измерение одной величины. Практическое применение такого вида измерений всегда сопряжено с большими погрешностями, поэтому следует проводить не менее трех однократных измерений и находить конечный результат как среднее арифметическое значение.

Многократные измерения позволяют получить результат из нескольких следующих друг за другом измерений одного и того же объекта. Обычно минимальное число измерений в данном случае больше трех. Конечный результат находят как среднее арифметическое значение из “n” единичных измерений в ряду измерений. Преимущество многократных измерений – в значительном снижении влияний случайных факторов на погрешность измерения.

По отношению к основным единицам различают *абсолютные и относительные измерения*.

Абсолютные измерения основаны на прямых измерениях основных величин и/или использовании значений физических констант (например, измерение длины штангенциркулем или микрометром).

При *относительных измерениях* величину сравнивают с одноименной, играющей роль единицы или принятой в качестве исходной. Примером относитель-

ного измерения является измерение высоты детали измерительной головкой, установленной в штативе и настроенной на ноль с помощью меры.

По характеру изменения измеряемой величины различают статические и динамические измерения.

Статические измерения – измерения величины, которую считают неизменной в период измерения.

Динамические измерения - измерения величины, которая изменяется в период измерения.

По цели измерения различают технические и метрологические измерения.

Технические измерения – измерения с целью получения данных о свойствах материальных объектов, процессов и явлений окружающего мира.

Метрологические измерения – измерения с помощью эталонов для обеспечения единства и необходимой точности технических измерений

Методы измерений.

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

По способу сравнения измеряемой величины с единицей различают *метод непосредственной оценки* и *метод сравнения с мерой*.

При методе непосредственной оценки значение физической величины определяют непосредственно по показаниям средства измерений (например, измерение давления пружинным манометром).

При методе сравнения с мерой измеряемую величину сравнивают с мерой. Например, с помощью гирь уравнивают на рычажных весах измеряемую массу детали. Разновидности метода сравнения с мерой:

- *метод противопоставления*, при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, позволяющий установить соотношение между этими величинами (например, измерение сопротивления по мостовой схеме с включением в диагональ моста показывающего прибора).

- *дифференциальный метод* позволяет измеряемую величину сравнить с известной величиной, воспроизводимой мерой. Этим методом, например, определяют отклонение размера детали на оптиметре после его настройки на ноль с помощью меры;
- *нулевой метод*, при котором результат воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля. Примером является измерение электрического сопротивления с применением уравниваемой мостовой схемы;
- *метод совпадений*, при котором разность между мерой и измеряемой величиной определяют, используя совпадения отметок шкал (при измерении штангенциркулем) или периодических сигналов.

При измерении линейных величин различают контактный и бесконтактный методы измерений.

1.10 Метрологические характеристики средств измерений.

Метрологическая характеристика средства измерения – это характеристика одного из свойств СИ, влияющая на результат измерения и его погрешность. Перечень метрологических характеристик, правила выбора комплекса нормируемых метрологических характеристик для средств измерений и способы их нормирования изложены в ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

1 *Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений (без введения поправки)*

- Функция преобразования измерительного преобразователя, а также измерительного прибора с неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц входной величины, $-f(x)$.
- Значение однозначной или значения многозначной меры $-Y$.
- Цена деления шкалы измерительного прибора или многозначной меры.
- Вид выходного кода, число разрядов кода, цена единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде.

2 Характеристики погрешностей средств измерений

Характеристики *систематической* составляющей Δ_s погрешности средств измерений выбирают из числа следующих:

- значение систематической составляющей Δ_s или
- значение систематической составляющей Δ_s , математическое ожидание $M[\Delta_s]$ и среднее квадратическое отклонение $S[\Delta_s]$ систематической составляющей погрешности.

Характеристики *случайной* составляющей $\overset{\circ}{\Delta}$ погрешности средств измерений выбирают из числа следующих:

- среднее квадратическое отклонение $S[\overset{\circ}{\Delta}]$ случайной составляющей погрешности или
- среднее квадратическое отклонение $S[\overset{\circ}{\Delta}]$ случайной составляющей погрешности, нормализованная автокорреляционная функция $r_{\overset{\circ}{\Delta}}(\tau)$ или функция спектральной плотности $S_{\overset{\circ}{\Delta}}(\omega)$ случайной составляющей погрешности.

Характеристика *случайной* составляющей $\overset{\circ}{\Delta}_H$ погрешности от гистерезиса - вариация H выходного сигнала (показания) средства измерений.

Характеристика погрешности средств измерений – значение погрешности.

Примечание. Погрешность средств измерений рассматривается как случайная величина на множестве средств измерений данного типа.

В нормативно-технической документации (НТД) на средства измерений конкретных видов или типов допускается нормировать функции или плотности распределения вероятностей систематической и случайной составляющих погрешности.

3. Характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам выбирают из числа следующих:

- Функции влияния $\psi(\xi)$.
- Изменения $e(\xi)$ значений МХ средств измерений, вызванные изменениями влияющих величин ξ в установленных пределах.

4. Динамические характеристики средств измерений

Полные динамические характеристики:

- переходная характеристика $h(t)$;
- импульсная переходная характеристика $g(t)$;
- амплитудно-фазовая характеристика $G(j\omega)$;
- амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ - для минимально-фазовых средств измерений;
- совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик;
- передаточная функция $G(S)$.

Частные динамические характеристики - любые функционалы или параметры полных динамических характеристик.

Погрешность средства измерений – это разность между показаниями СИ и истинным (действительным) значением измеряемой величины. Для рабочего СИ за действительное значение принимают показания рабочего эталона низшего разряда (допустим, 4-го), для эталона 4-го разряда, в свою очередь, - значение величины, полученное с помощью рабочего эталона 3-го разряда. Таким образом, за базу для сравнения принимают значение СИ, которое является в поверочной схеме вышестоящим по отношению к подчиненному СИ, подлежащему поверке.

Погрешность средств измерений вычисляется по формуле:

$$\Delta_{\text{СИ}} = X_{\text{СИ}} - X_{\text{ист(действ)}} \quad (1.3)$$

где $X_{\text{СИ}}$ – показания СИ; $X_{\text{ист(действ)}}$ – истинное (действительное) значение измеряемой величины.

Определяемая по формуле (1.3) $\Delta_{\text{СИ}}$, является *абсолютной погрешностью*. Однако в большей степени точность СИ характеризует *относительная погрешность* (δ), т.е. выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к действительному значению величины, измеряемой или воспроизводимой данным СИ:

$$\delta = \frac{100 \cdot \Delta_{\text{СИ}}}{X_{\text{ист(действ)}}} \quad (1.4)$$

Метрологические показатели средств измерений.

Длина деления шкалы (рис. 1.2) — расстояние между осями (центрами) двух соседних отметок шкалы, измеренное вдоль воображаемой линии, проходящей через середины самых коротких отметок шкалы.

Цена деления шкалы — разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы (на рис. 1.2 цена деления шкалы 0,01 мм).

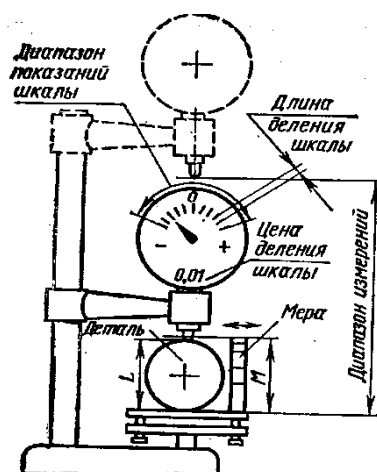


Рис. 1.2. Схема, поясняющая основные характеристики средств измерений

Диапазон показаний (по шкале) — область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы, т. е. наибольшим и наименьшим значениями измеряемой величины. Например, для микрометра типа МК диапазон показаний составляет 0,5 мм.

Диапазон измерений — область значений измеряемой величины с нормированными допускаемыми погрешностями средства измерений. *Пределы измерений* — наименьшее и наибольшее значения диапазона измерений.

Чувствительность СИ определяется отношением изменения выходного сигнала к вызывающему его изменению измеряемой величины. *Порог чувствительности* — наименьшее изменение измеряемой величины, которое вызывает заметное изменение выходного сигнала.

Вариация показаний – разность показаний СИ в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

Стабильность СИ – свойство, выражающее неизменность во времени его метрологических характеристик (показаний).

Отсчет показаний по шкалам отсчетного устройства СИ выполняют в соответствии с уравнением

$$A = M + \sum_{k=1}^p n_k i_k + m_p i_p,$$

где A — значение отсчета; M — размер меры, по которому отсчетное устройство установлено на ноль; n — число целых делений, отсчитываемое по шкалам отсчетного устройства; i — цена деления шкалы; k — номер шкалы; m — доля деления шкалы с наименьшей ценой деления, оцененная визуально.

Способы нормирования и формы выражения метрологических характеристик [ГОСТ 8.401-80].

Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей следует выражать в форме приведенных, относительных или абсолютных погрешностей в зависимости от характера измерения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения средств измерений конкретного вида.

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливают по формуле

$$\Delta = \pm a \tag{1.5}$$

или

$$\Delta = \pm(a + bx), \tag{1.6}$$

где Δ - пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, выраженной в единицах измеряемой величины на входе (выходе) или условно в делениях шкалы;

x - значение измеряемой величины на входе (выходе) средств измерений или число делений, отсчитанных по шкале;

a, b - положительные числа, не зависящие от x .

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности следует устанавливать по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} = \pm p, \quad (1.7)$$

где γ - пределы допускаемой приведенной основной погрешности, %;

Δ - пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, устанавливаемые по формуле (1.5);

X_N - нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ ;

p - отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда $1 \cdot 10^{-n}$; $1,5 \cdot 10^{-n}$; $2 \cdot 10^{-n}$; $2,5 \cdot 10^{-n}$; $4 \cdot 10^{-n}$; $5 \cdot 10^{-n}$; $6 \cdot 10^{-n}$; ($n = 1, 0, -1, -2$, и т. д.).

Нормирующее значение X_N для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, а также для измерительных преобразователей, если нулевое значение входного (выходного) сигнала находится на краю или вне диапазона измерений, следует устанавливать равным большому из пределов измерений или равным большому из модулей пределов измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений.

Для электроизмерительных приборов с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой и нулевой отметкой внутри диапазона измерений нормирующее значение допускается устанавливать равным сумме модулей пределов измерений.

Для средств измерений физической величины, для которых принята шкала с условным нулем, нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений.

Для средств измерений с установленным номинальным значением нормирующее значение устанавливают равным этому номинальному значению.

Для измерительных приборов с существенно неравномерной шкалой нормирующее значение устанавливают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерений. В этом случае пределы абсолютной погрешности выражают, как и длину шкалы, в единицах длины.

Пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm q, \quad (1.8)$$

если Δ установлено по формуле (1.5), или по формуле

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_K}{x} \right| - 1 \right) \right], \quad (1.9)$$

где δ - пределы допускаемой относительной основной погрешности, %;

Δ , x - см. формулу (1.6);

q - отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда чисел p , приведенного в формуле (1.7) ;

X_K - больший (по модулю) из пределов измерений;

c , d - положительные числа, выбираемые из ряда чисел p , приведенного в формуле (1.7).

$$c = b + d; d = \frac{a}{|X_K|};$$

a , b - см . формулу (1.6).

1.11 Обозначение классов точности средств измерений [ГОСТ 8.401-80].

Класс точности СИ - обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемых (основной и дополнительной) погрешностей, а также другими свойствами, влияющими на точность. Класс точности характеризует свойства средства измерения, но не является показателем точности выполненных измерений, по-

скольку при определении погрешности измерения необходимо учитывать погрешности метода, настройки и др. Классы точности конкретного типа СИ устанавливаются в нормативной документации (НД).

Обозначение классов точности средств измерений в документации.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме абсолютных погрешностей или относительных погрешностей, причем последние установлены в виде графика, таблицы или формулы, не приведенной в п.1.10, классы точности следует обозначать в документации прописными буквами латинского алфавита или римскими цифрами.

В необходимых случаях к обозначению класса точности буквами латинского алфавита допускается добавлять индексы в виде арабской цифры. Классам точности, которым соответствуют меньшие пределы допускаемых погрешностей, должны соответствовать буквы, находящиеся ближе к началу алфавита, или цифры, означающие меньшие числа.


Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме приведенной погрешности или относительной погрешности в соответствии с формулой (1.8), классы точности в документации следует обозначать числами, которые равны этим пределам, выраженным в процентах.

Для средств измерений, пределы допускаемой основной погрешности которых принято выражать в форме относительных погрешностей в соответствии с формулой (1.9), классы точности в документации следует обозначать числами c и d , разделяя их косой чертой (см.таблицу 1).

Обозначение классов точности на средствах измерений.

На циферблаты, щитки и корпуса средств измерений должны быть нанесены условные обозначения классов точности, включающие числа, прописные буквы латинского алфавита или римские цифры с добавлением знаков, указанных в таблице 1.

При указании классов точности на измерительных приборах с существенно неравномерной шкалой допускается для информации дополнительно указывать пределы допускаемой основной относительной погрешности для части шкалы,

лежащей в пределах, отмеченных специальными знаками (например точками или треугольниками). К значению предела допускаемой относительной погрешности в этом случае добавляют знак процента и помещают в кружок, например . Этот знак не является обозначением класса точности.

Обозначение класса точности допускается не наносить на высокоточные меры, а также на средства измерений, для которых действующими стандартами установлены особые внешние признаки, зависящие от класса точности, например параллелепипедная и шестигранная форма гирь общего назначения.

За исключением технически обоснованных случаев вместе с условным обозначением класса точности на циферблат, щиток или корпус средств измерений должно быть нанесено обозначение стандарта или технических условий, устанавливающих технические требования к этим средствам измерений.

На средства измерений, для одного и того же класса точности которых в зависимости от условий эксплуатации установлены различные рабочие области влияющих величин, следует наносить обозначения условий их эксплуатации, предусмотренные в стандартах или технических условиях на эти средства измерений.

Правила построения и примеры обозначения классов точности в документации и на средствах измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Форма выражения погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности, %	Обозначение класса точности	
			в документации	на средстве измерений
Приведенная	По формуле (1.7): - если нормирующее значение выражено в единицах величины	$\gamma = \pm 1,5$	Класс точности 1,5	1,5

	на входе (выходе) средств измерений; - если нормирующее значение принято равным длине шкалы или ее части	$\gamma = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	$\nabla 0,5$
Относительная	По формуле (1.8)	$\delta = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	$\odot 0,5$
	По формуле (1.9)	$\delta = \frac{\Delta}{x} = \pm \left[c + d \left(\left \frac{X_k}{x} \right - 1 \right) \right]$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01
Абсолютная	По формуле (1.5) или (1.6)		Класс точности М	М
Относительная			Класс точности С	С

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

1.12. Универсальные средства измерений.

Универсальные средства используют для измерения различных геометрических параметров либо непосредственно, либо в сочетании с предметными столиками, плитами, стойками, штативами струбцинами и другими дополнительными приспособлениями.

Классификация универсальных средств измерений.

Измерительные инструменты. К этой группе относятся *штангенинструменты* и *микрометрические инструменты*. Эти инструменты широко используют для контроля наружных и внутренних размеров (штангенциркули, микрометры, микрометрические штихмасы), глубин и высот пазов (штангенглубиномеры, микрометрические глубиномеры), высот и разметки деталей (штангенрейсмусы) и др. При оснащении этих инструментов специальными губками и вставками их можно использовать для контроля размеров (параметров) резьб, листов труб, зубчатых

колес и т. д. Штангенинструмент имеет линейку с основной шкалой и шкалой нониуса, позволяющего по порядковому номеру совпадающих штрихов отсчитать дробные доли деления основной шкалы. Микрометрические измерительные инструменты имеют винтовую пару, гайка которой жестко скреплена с корпусом, снабженным основной шкалой, а винт скреплен с цилиндром, имеющим круговую шкалу.

Измерительные головки. Это обширная группа приборов, главным образом механических. Их используют в сочетании со стойками и штативами или как составные части сложных средств измерений (рычажных скоб, нутромеров, толщиномеров, глубиномеров и др.). Наиболее распространенными являются *индикаторы*, имеющие зубчатую или рычажно-зубчатую повышающие передачи.

Наиболее точными измерительными головками этой группы являются приборы с пружинной передачей (микрокаторы и оптикаторы).

Оптико-механические измерительные приборы. Эти приборы позволяют выполнять измерения различных изделий с высокой точностью. По сравнению с механическими головками они имеют значительно бóльшие пределы измерений, могут иметь дисплей с цифровым отсчетом. При необходимости их можно использовать для автоматического управления производственными процессами. Оптико-механические приборы бывают контактные (оптиметры, длиномеры, измерительные машины) и бесконтактные (микроскопы и проекторы).

Интерферометры. Устройства, в которых для измерений использовано явление интерференции света, относятся к наиболее точным средствам измерений. Их применяют для аттестации концевых мер, калибров и образцовых деталей. В сочетании с лазерными источниками света они позволяют регистрировать изменение длины до 10^{-13} м.

1.13. Автоматические средства измерений.

По степени автоматизации процессов средства контроля подразделяют на следующие: 1) приспособления (механизированные с несколькими универсальными головками и автоматизированные световые с различными датчиками), в кото-

рых операции загрузки и съема осуществляются вручную; 2) полуавтоматические системы, в которых операция загрузки осуществляется вручную, а остальные операции — автоматически; 3) автоматические системы, в которых весь цикл работы автоматизирован; 4) самонастраивающиеся (адаптивные) автоматические системы, в которых автоматизированы циклы работы и настройки, или системы, которые могут приспосабливаться к изменяющимся условиям среды. По воздействию на технологический процесс автоматические средства подразделяю на *средства пассивного контроля (контрольные автоматы)*, осуществляющие лишь рассортировку деталей на группы качества без непосредственного участия человека, и *средства активного контроля*, в которых результаты контроля используются для автоматического управления производственным процессом, вызывая изменение его параметров и улучшая показатели качества. Действие автоматизированных приспособлений, контрольных автоматов и средств активного контроля основано на использовании различного рода измерительных преобразователей. Измерительный преобразователь как составной элемент входит в *датчик*, который является самостоятельным устройством и кроме преобразователя, содержит измерительный шток, рычаг с наконечником, передающий механизм, элементы настройки и др. Остальные элементы электрической цепи измерительной (контрольной) системы конструктивно оформляют в виде отдельного устройства (*электронного блока*, или *электронного реле*). Наибольшее распространение получили измерительные (контрольные) средства с электроконтактными, пневмоэлектроконтактными, индуктивными, емкостными, фотоэлектрическими, радиоизотопными и электронными преобразователями.

Устройства активного контроля. Различают четыре вида устройств активного контроля: управляющие *автотолераторы*, регулирующие *автоподналадчики*, *защитные устройства* и *автоблокировщики*.

Автотолераторы автоматически изменяют характер процесса при достижении действительным контролируемым параметром предписанного значения.

Автоподналадчики автоматически осуществляют настройку производственной системы, обеспечивая равенство контролируемых параметров предписанным значениям.

Защитные устройства предотвращают попадание в рабочую зону изделия, параметры которых выходят за предписанные значения.

Автоблокировщики прекращают течение процесса при выходе контролируемых параметров изделий за предписанные значения или при возникновении других недопустимых, критических ситуаций.

1.14 Термометры

Электрические термометры сопротивления.

Для измерения температур до 650°C применяют электрические **термометры сопротивления** (ТС), принцип действия которых основан на использовании зависимости электрического сопротивления вещества от температуры (изменяют свою проводимость в зависимости от температуры). Зная данную зависимость, по изменению величины сопротивления термометра судят о температуре среды, в которую он погружен. Выходным параметром устройства является электрическая величина. Такие термометры позволяют измерять температуру с высокой точностью (до $0,02^{\circ}\text{C}$) и передавать показания на большие расстояния и использовать непосредственно в системах централизованного контроля и регулирования: при этом к одному измерительному прибору поочередно подключаются несколько десятков термометров.

В качестве материалов для изготовления чувствительных элементов ТС используются чистые металлы: платина, медь, никель, железо и полупроводники.

Полупроводниковые термометры сопротивления, которые называют **термисторами**, применяются в диапазоне температур от -90 до $+180^{\circ}\text{C}$. В качестве чувствительного элемента в полупроводниковых термометрах сопротивления (ТСПП) используют германий, окиси меди и марганца, титана и магния и др.

Термоэлектрические термометры.

Для измерения температуры в металлургии наиболее широкое распространение получили термоэлектрические термометры, работающие в интервале температур от -200 до $+2500^{\circ}\text{C}$ и выше.

Термоэлектрический термометр (ТТ) – это измерительный преобразователь, чувствительный элемент которого (термопара) расположен в специальной защитной арматуре, обеспечивающей защиту термоэлектродов от механических повреждений и воздействия измеряемой среды. Действие термопары основано на эффекте Зеебека – возникновение электрического тока в цепи, состоящей из двух разнородных металлов, при наличии разности температур между их спаями. Термопары – самые распространенные в промышленности контактные датчики термометров.

Радиационные термометры.

Радиационные термометры представляют собой неконтактные температурные датчики, действие которых основано на зависимости температуры от количества теплового электромагнитного излучения, полученного от объекта измерения.

1.15 Погрешности измерений.

Погрешность результата измерения - это отклонение результата измерения ($X_{\text{изм}}$) от истинного (действительного) значения ($X_{\text{ист(действ)}}$) измеряемой величины.

В зависимости от способа выражения различают абсолютную, относительную и приведенную погрешности (см п. 1.10).

В зависимости от способа обработки ряда измерений различают: среднюю арифметическую и средние квадратичные погрешности.

Средняя арифметическая погрешность

$$\overline{\Delta}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{xi} ,$$

где Δ_{xi} – погрешность i -го единичного измерения; n – число единичных измерений в ряду.

В качестве истинного значения при многократных измерениях одной и той же величины используют среднее арифметическое значение \bar{X} :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i , \quad (1.10)$$

где X_i – результат i -го единичного измерения; n – число единичных измерений в ряду.

Величина \bar{X} , полученная в одной серии измерений, является случайным приближением к $X_{\text{ист}}$. Для оценки ее возможных отклонений от $X_{\text{ист}}$ определяют опытную *среднюю квадратичную погрешность* (СКП)

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}},$$

которая получена из ряда равноточных измерений.

Для оценки рассеяния единичных результатов измерений в ряду равноточных измерений величины около среднего их значения используют СКП:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \text{ при } n < 20 \quad (1.11)$$

или

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}, \text{ при } n \geq 20, \quad (1.12)$$

отсюда

$$S_{\bar{X}} = S / \sqrt{n}, \quad (1.13)$$

т.е. СКП из серии измерений всегда меньше, чем в каждом отдельном измерении, отсюда следует, что для повышения точности измерений необходимо увеличивать число измерений.

В зависимости от способа выявления следует различать *составляющие* и *суммарные погрешности измерения*.

В зависимости от причины (источника) возникновения различают следующие виды составляющих погрешностей. *Инструментальная погрешность* зависит от погрешностей применяемых средств (качества их изготовления). *Методическая погрешность* обусловлена несовершенством метода измерений. *Субъективная погрешность* возникает из-за низкой степени квалификации оператора средства измерений, а также из-за погрешности зрительных органов человека, т. е.

причиной возникновения субъективной погрешности является человеческий фактор (например, *погрешность отсчитывания*, вызванная недостаточно точным отсчитыванием показаний средств измерений).

По полноте охвата измерительной задачи различают: *частные* и *полные* погрешности.

По характеру проявления погрешности различают: *систематические*, *случайные* и *грубые* погрешности.

Систематическая погрешность измерения остается постоянной или изменяется по определенному закону при повторных измерениях одной и той же величины. Постоянная систематическая погрешность может быть вызвана например, отклонением рабочей температуры от нормальной (20°C).

Случайными называют непостоянные по абсолютному значению и знаку погрешности, которые возникают при изготовлении или измерении и зависят от случайных факторов. Характерный их признак – изменение значений, принимаемых ими в повторных измерениях.

Грубая погрешность измерения существенно превышает ожидаемую погрешность.

Погрешность результата измерения является *суммарной*. Она может состоять из погрешностей: применяемых средств измерения (инструментальной погрешности); метода измерения; установочной меры и установки по ней прибора; температурной; вызванных измерительным усилием средства измерений и непостоянством этого усилия.

Для повышения точности измерений рекомендуется выполнять не одно, а несколько измерений одной величины X при одинаковых условиях.

Постоянные систематические погрешности суммируют алгебраически, т. е. с учетом знака; переменные – по наибольшим абсолютным значениям, т. е. с тем знаком, при котором суммарная погрешность по абсолютному значению будет наибольшей.

При нормальном законе распределения результатов измерений с вероятностью, равной 0,9973, случайная предельная погрешность измерения составляет:

$$\Delta_{lim} = \pm 3\sigma \approx \pm 3S, \quad (1.14)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение случайной величины;

S – опытная средняя квадратичная погрешность.

Из теории вероятностей известно, что дисперсия суммы нескольких независимых случайных величин равна сумме дисперсий этих величин. Учитывая, что дисперсия $D(x) = \sigma_x^2$, то можно записать

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{xi}^2}. \quad (1.15)$$

Суммарная предельная погрешность измерения или изготовления, состоящая из систематических и случайных погрешностей, на основании уравнений (1.14) и (1.15) определяется по формуле:

$$\Delta_{\Sigma lim} = \Sigma \Delta_{icuct} \pm \sqrt{\Delta_{lim 1}^2 + \Delta_{lim 2}^2 + \dots + \Delta_{lim n}^2}, \quad (1.16)$$

где $\Sigma \Delta_{icuct}$ – алгебраическая сумма систематических погрешностей;
 $\Delta_{lim 1}, \Delta_{lim 2}, \dots, \Delta_{lim n}$ – случайные предельные погрешности.

Формула (1.16) справедлива, если законы распределения всех случайных погрешностей близки к нормальному закону. При расчете наибольшей предельной погрешности для квадратичной суммы случайных погрешностей следует брать тот же знак, который имеет сумма систематических погрешностей $\Sigma \Delta_{icuct}$.

Погрешности концевых мер или установочных образцов входят в суммарную погрешность только при относительных измерениях.

Температурные погрешности пропорциональны измеряемым длинам, отклонениям температуры и разности коэффициентов линейного расширения материалов средств измерений и измеряемых объектов.

Температурная погрешность подсчитывается по формуле

$$\Delta_{t_{сучт}} = l [\alpha_1 (t_1 - 20) - \alpha_2 (t_2 - 20)], \quad (1.17)$$

где l - номинальный размер;

α_1 и α_2 - коэффициенты линейного расширения материалов измеряемого объекта и средства измерений;

t_1 и t_2 - температуры измеряемого объекта и средства измерений.

При косвенных измерениях погрешность величины Q зависит от погрешностей, с которыми были определены значения величин (аргументов) x_1, x_2, \dots, x_k . Для определения погрешности ΔQ используют приём, заключающийся в определении частных производных $\frac{\partial Q}{\partial x_i}$, которые можно рассматривать как коэффициенты (веса), с которыми в суммарную абсолютную погрешность ΔQ входят составляющие в виде абсолютных погрешностей измерения Δx_i каждого из x_i . Отсюда выражение для погрешности функции нескольких переменных, если погрешности x_i независимы и случайны, будет следующим:

$$\Delta Q = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial Q}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (1.18)$$

Выражение для средней квадратичной погрешности (СКП) функции нескольких независимых переменных, будет следующим:

$$S_Q = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial Q}{\partial x_i} S_{x_i} \right)^2}, \quad (1.19)$$

где S_{x_i} - СКП переменной (аргумента) x_i .

1.16. Выбор точности средств измерений.

Задачу измерения физической величины можно решить с помощью различных средств измерений, которые имеют не только разную стоимость, но и разные точность и другие метрологические показатели, а следовательно, дают неодинаковые результаты измерений. В связи с этим вопрос выбора точности средств измерения имеет большое значение. Так, предельные погрешности измерения наружных линейных размеров контактными средствами в диапазоне 80—120 мм составляют: для штангенциркулей 100—200 мкм, для гладких микрометров 10—

15 мкм, для измерительных головок пружинного типа 1 мкм, для лазерных интерферометров до 10^{-7} мкм. Таким образом, чем выше требуемая точность средства измерения, тем оно массивнее и дороже, тем выше требования, предъявляемые к условиям его использования.

При выборе измерительного средства необходимо учитывать допускаемую погрешность измерения $\Delta_{изм}$, которая зависит от допуска на физическую величину. Расчет $\Delta_{изм}$ выполняют двумя методами: приближенным и стандартным.

Приближенный метод определяет $\Delta_{изм}$ в диапазоне значений $(0,2 \dots 0,35)T$, где T – допуск на физическую величину. Допуск T – это разность наибольшего и наименьшего предельных значений физической величины назначенных в нормативно-технической документации (НТД). Например, для номинального размера h изделия допуск $T = h_{max} - h_{min}$, где h_{max} – наибольший предельный размер, h_{min} – наименьший предельный размер; или $T = E_s - E_i$, где верхнее предельное отклонение $E_s = h_{max} - h$; нижнее предельное отклонение $E_i = h_{min} - h$ (указываются в нормативно-технической документации, например: $2 \pm 0,16$; $3_{-0,26}$; 1200^{+5}).

Стандартный метод регламентирован ГОСТ 8.051-81, в котором допускаемые погрешности измерения даны для размеров от 1 до 500 мм и качеств 2-17 (качество – это уровень постоянной относительной точности линейных размеров гладких плоских и цилиндрических поверхностей металлических и пластмассовых изделий).

Допускаемая погрешность измерения $\Delta_{изм}$ состоит из случайной и несистематической составляющих погрешности. При этом случайная составляющая погрешности принимается равной $2S$ и не должна превышать 0,6 от погрешности $\Delta_{изм}$.

Предельная погрешность измерения Δ_{lim} (характеристика) выбранного измерительного средства должна удовлетворять следующему условию:

$$\Delta_{lim} \leq \Delta_{изм} \quad (1.20)$$

Если условию (1.20) удовлетворяют несколько измерительных средств, то из них выбирают одно, у которого погрешность измерения Δ_{lim} наибольшая.

1.17. Обработка результатов измерений.

Обработка результатов однократных измерений.

За результат измерения в этом случае принимают результат однократного наблюдения x (с введением поправки, если она имеется), используя данные об источниках составляющих погрешностей. Доверительные границы неисклѐченной систематической погрешности (НСП) результата измерения находят по формуле:

$$\Theta(P) = k(P) \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2},$$

где Θ_i - границы отдельных НСП общим числом m ; $k(P)$ - коэффициент, принимаемый равным 1,1 при доверительной вероятности $P=0,95$ и 1,2...1,45 в зависимости от числа m при $P=0,99$.

СКП результата измерения с однократным наблюдением вычисляют одним из следующих способов:

Если в паспорте средства измерений указаны нормально распределенные составляющие случайной погрешности результата наблюдения, то СКП вычисляют по формуле

$$S(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^k S_i^2(x)},$$

где k – число составляющих случайной погрешности; $S_i(x)$ – значения СКП этих составляющих.

Доверительную границу случайной погрешности результата измерения $\Delta(P)$ в этом случае определяют по формуле

$$\Delta(P) = z_{p/2} S(x),$$

Где $z_{p/2}$ – значение нормированной функции Лапласа в точке $P/2$ при доверительной вероятности P :

1.18. Обработка результатов многократных измерений.

Прямые многократные измерения делятся на равноточные и неравноточные. При равноточных измерениях средние квадратичные погрешности (СКП) результатов всех рядов измерений равны между собой.

Перед проведением обработки результатов измерения необходимо удостовериться в том, что

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

Методика обработки результатов многократных измерений

Исходной информацией для обработки является ряд из $n > 4$ результатов измерения $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ из которых исключены известные систематические погрешности - выборка. Число n зависит как от требований к точности получаемого результата, так и от реальной возможности выполнять повторные измерения.

Последовательность обработки результатов прямых многократных измерений состоит из ряда этапов.

1-й этап: определение точечных оценок закона распределения результатов измерений. На этом этапе определяются:

- среднее арифметическое значение \bar{X} измеряемой величины по формуле (1.9);
- СКП результата измерения S по формулам (1.11) или (1.12);
- СКП среднего арифметического значения $S_{\bar{X}}$ по формуле (1.10).

В соответствии с критериями грубые погрешности и промахи исключаются, после чего проводится повторный расчёт оценок среднего арифметического значения и его СКП. В ряде случаев для более надёжной идентификации закона распределения результатов измерения могут определяться другие точечные оценки: коэффициент асимметрии, эксцесс и контрэксцесс, энтропийный коэффициент.

2-й этап: определение закона распределения результатов измерения или случайных погрешностей измерения. В последнем случае от выборки результатов измерения $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ переходят к выборке отклонений от среднего арифметического.

Первым шагом при идентификации закона распределения является построение по исправленным результатам измерения X_i , где $i = 1, 2, \dots, n$, *вариационного ряда* (упорядоченной выборки), в котором результаты измерения (или их отклонения от среднего арифметического) располагают в порядке возрастания от X_{min} до X_{max} . Далее этот ряд разбивается на оптимальное число m , как правило, одинаковых *интервалов группирования* длиной, которая вычисляется по формуле:

$$h = (X_{max} - X_{min})/m, \quad (1.19)$$

где m – число интервалов, находящееся в пределах от $m_{min} = 0,55 n^{0,4}$ до $m_{max} = 1,25 n^{0,4}$.

Искомое значение m должно быть нечётным, так как при чётном m в островеином или двухмодальном симметричном распределении результатов измерения в центре гистограммы оказываются два равных по высоте столбца и середина кривой распределения искусственно уплощается. В случае, если гистограмма распределения явно двухмодальная, число столбцов может быть увеличено в 1,5—2 раза, чтобы на каждый из двух максимумов приходилось примерно по m интервалов. Полученное значение длины интервала группирования h всегда округляют в большую сторону, иначе последняя точка окажется за пределами крайнего интервала.

Далее определяют интервалы группирования экспериментальных данных в виде $x_0 \dots x_1; x_1 \dots x_2; \dots; x_{k-1} \dots x_k$ и подсчитывают число попаданий n_k результатов измерения в каждый интервал группирования. Сумма этих чисел должна равняться числу измерений. По полученным значениям рассчитывают вероятности попадания результатов измерения (частоты) в каждый из интервалов группирования по формуле $P_k = n_k/n$ и кумулятивную (накопленную) частоту:

$$F_k = \sum_{i=1}^k P_k, \quad (1.20)$$

где k – номер строки в табл. 1.1 с результатами расчетов.

Результаты расчетов

Таблица 1.1

№ строки	интервал	Число наблюдений n_k	Частота P_k	Кумулятивная частота F_k
1	$x_0 \dots x_1$	n_1	n_1/n	n_1/n
2	$x_1 \dots x_2$	n_2	n_2/n	$(n_1+n_2)/n$
....
k	$x_{k-1} \dots x_k$	n_k	n_k/n	$(n_1+n_2+..+n_k)/n$

Проведенные расчёты позволяют построить гистограмму, полигон и кумулятивную кривую. Используем данные второго, четвёртого и пятого столбцов таблицы. Для построения гистограммы по оси результатов наблюдений x (рис. 1.3а) откладываются интервалы группирования в порядке возрастания номеров и на каждом интервале строится прямоугольник высотой P_k . При увеличении числа интервалов и, соответственно, при уменьшении их длины гистограмма всё более приближается к гладкой кривой-графику плотности распределения вероятности. Следует отметить, что в ряде случаев производят расчётное симметрирование гистограммы.

Полигон представляет собой ломаную кривую, соединяющую середины верхних оснований каждого столбца гистограммы (рис. 1.3а). Он более наглядно, чем гистограмма, отражает форму кривой распределения. За пределами гистограммы справа и слева остаются пустые интервалы, в которых точки, соответствующие их серединам, лежат на оси абсцисс. Эти точки при построении полигона соединяют между собой отрезками прямых линий. В результате совместно с осью x образуется замкнутая фигура, площадь которой пропорциональна числу наблюдений n .

Кумулятивная кривая - это график статистической функции распределения. Для её построения по оси результатов наблюдений x (рис. 1.3б) откладывают интервалы группирования в порядке возрастания номеров и на каждом интервале строят прямоугольник высотой F_k .

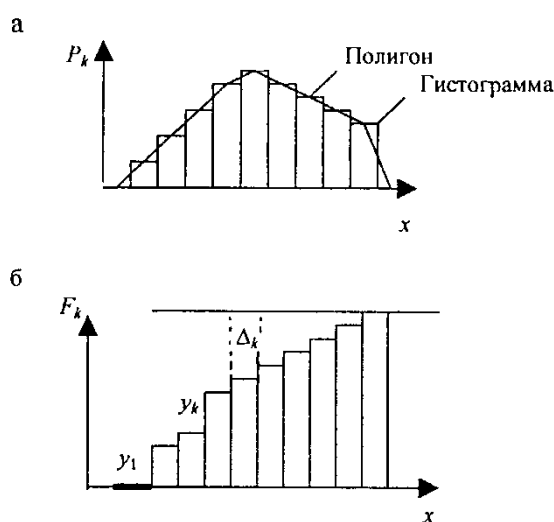


Рис.1.3. Гистограмма:
Полигон (а) и кумулятивная кривая (б)

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

3-й этап: оценка закона распределения по статистическим критериям и идентификация формы распределения результатов измерения. В качестве способа оценки близости распределения выборки экспериментальных данных к принятой аналитической модели закона распределения используются критерии согласия. Известен целый ряд критериев согласия, предложенных разными авторами. При числе наблюдений $n > 50$ для идентификации закона распределения используется критерий Пирсона или критерий Мизеса - Смирнова. При числе наблюдений $50 > n > 15$ для проверки нормальности закона распределения применяется составной критерий (d-критерий), приведенный в ГОСТ 8.207 - 76. При числе наблюдений $n < 15$ принадлежность экспериментального распределения к нормальному не про-

веряется.

Наибольшее распространение в практике получил критерий Пирсона. Идея этого метода состоит в контроле отклонений гистограммы экспериментальных данных от гистограммы с таким же числом интервалов, построенной на основе распределения, совпадение с которым определяется. Использование критерия Пирсона возможно при большом числе измерений ($n > 50$) и заключается в вычислении величины χ^2 (хи-квадрат):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - N_i)^2}{N_i} = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - nP_i)^2}{nP_i}, \quad (1.21)$$

где n_i ; N_i - экспериментальные и теоретические значения частот в i -м интервале разбиения; m - число интервалов разбиения;

P_i - значения вероятностей в том же интервале разбиения, соответствующие выбранной модели распределения.

При $n \rightarrow \infty$ случайная величина χ^2 имеет распределение Пирсона с так называемым числом степеней свободы $V = m - l - r$, где r - число определяемых по статистике параметров, необходимых для совмещения модели и гистограммы. Для нормального закона распределения $r = 2$, так как закон однозначно характеризуется указанием двух его параметров - математического ожидания и СКП.

Если бы выбранная модель в центрах всех m столбцов совпадала с экспериментальными данными, то все m разностей $(n_i - N_i)$ были бы равны нулю, а следовательно, и значение критерия также было бы равно нулю. Таким образом, χ^2 есть мера суммарного отклонения между моделью и экспериментальным распределением.

Критерий χ^2 не инвариантен числу столбцов и существенно возрастает с увеличением их числа. Поэтому для использования его при разном числе столбцов составлены таблицы квантилей распределения χ^2 , входом в которые служит число степеней свободы V . Чтобы совместить модель, соответствующую нормальному закону, с гистограммой, необходимо совместить координату центра, а для того, чтобы ширина модели соответствовала ширине гистограммы, её нужно задать как $r=2$ и $V=m-3$.

Если вычисленная по опытным данным мера расхождения χ^2 меньше определённого из таблицы значения $\chi^2_{\text{к}}$, то гипотеза о совпадении экспериментального и выбранного теоретического распределений принимается. Это не значит, что гипотеза верна. Можно лишь утверждать, что она правдоподобна, т.е. она не противоречит опытным данным. Если же χ^2 выходит за границы доверительного интервала, то гипотеза отвергается как противоречащая опытным данным.

Методика определения соответствия экспериментального и принятого законов распределения заключается в следующем: определяют оценки среднего арифметического значения \bar{X} и СКП S по формулам (1.9) - (1.12); группируют результаты многократных наблюдений по интервалам длиной h , число которых определяют так же, как и при построении гистограммы; для каждого интервала разбиения определяют его центр x_{i0} и подсчитывают число наблюдений n_i , попавших в каждый интервал; вычисляют число наблюдений для каждого из интервалов, теоретически существующее в выбранной аналитической модели распределения. Для этого сначала от реальных середин интервалов x_{i0} производят переход к нормированным серединам $z_i = (x_{i0} - \bar{X}) / S$. Затем для каждого значения z_i с помощью аналитической модели находят значение функции плотности вероятностей $f(z_i)$. Например, для нормального закона значение функции плотности вероятностей равно:

$$f(z_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-z_i^2/2}.$$

По найденному значению $f(z_i)$ определяют ту часть N_i имеющихся наблюдений, которая теоретически должна быть в каждом из интервалов

$$N_i = n \cdot h \cdot f(z_i) / S,$$

где n - общее число наблюдений; если в какой-либо интервал теоретически попадает меньше пяти наблюдений, то в обеих гистограммах его соединяют с соседним интервалом. После этого определяют число степеней свободы $V = m - l - r$, где m - общее число интервалов. Если было произведено укрупнение, то m - число

интервалов после укрупнения; по формуле (1.21) определяют показатель разности частот χ^2 , выбирают уровень значимости критерия q , который должен быть небольшим. По уровню значимости и числу степеней свободы V по табл. 3 находят границу критической области χ^2_q такую, что $P\{\chi^2 > \chi^2_q\} = q$. Вероятность того, что полученное значение χ^2 превышает χ^2_q , равна q и мала. Поэтому если оказывается, что $\chi^2 > \chi^2_q$, то гипотеза о совпадении экспериментального и теоретического законов распределения отвергается. Если же $\chi^2 < \chi^2_q$ то гипотеза принимается.

Таблица 3

Значения χ^2_q при различном уровне значимости

V	χ^2_q при уровне значимости q , равном								
	0.99	0.95	0.9	0.8	0.5	0.2	0.1	0.05	0.02
2	0,02	0,10	0,21	0,45	1,39	3,22	4,61	5,99	7,82
4	0,30	0,71	1,06	1,65	3,36	5,99	7,78	9,49	11,67
6	0,87	1,63	2,20	3,07	5,35	8,56	10,65	12,59	15,03
8	1,65	2,73	3,49	4,59	7,34	11,03	13,36	15,51	18,17
10	2,56	3,94	4,87	6,18	9,34	13,44	15,99	18,31	21,16
12	3,57	5,23	6,30	7,81	11,34	15,81	18,55	21,03	24,05
14	4,66	6,57	7,79	9,47	13,34	18,15	21,06	23,69	26,87
16	5,81	7,96	9,31	11,20	15,34	20,46	23,54	26,30	29,63
20	8,26	10,85	12,44	14,58	19,34	25,04	28,41	31,41	35,02
25	11,52	14,61	16,47	18,94	24,34	30,68	34,38	37,65	41,57
30	14,95	18,46	20,60	23,36	29,34	36,25	40,26	43,77	47,96

Чем меньше q , тем больше значение χ^2_q (при том же числе степеней свободы V), тем легче выполняется условие $\chi^2 < \chi^2_q$ и принимается проверяемая гипотеза. Не рекомендуется принимать $0,02 \leq q \leq 0,1$.

6-й этап: определение доверительных границ погрешности результата измерения. Данная операция осуществляется путём суммирования СКП случайной составляющей $S_{\bar{X}}$ и границ неисключённой систематической составляющей Θ в зависимости от соотношения

$$\Theta / S_{\bar{X}}.$$

Если выполняется условие $\Theta / S_{\bar{X}} < 0,8$, то систематической погрешностью можно пренебречь и определять доверительные границы погрешности результата по формуле (1.22). Если $\Theta / S_{\bar{X}} > 8$, то можно пренебречь случайной погрешностью и тогда $\Delta_p = \Theta$. Если $0,8 < \Theta / S_{\bar{X}} < 8$, то учитывают и случайную и систематическую составляющие. В этом случае вычисляют среднюю квадратичную погрешность результата как сумму неисключенной систематической и случайной составляющих

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^p \left(\frac{\Theta_i^2}{3} + S_{\bar{X}}^2 \right)}.$$

Границы погрешности результата измерения в этом случае вычисляют по формуле

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

Коэффициент K вычисляют по эмпирической формуле

$$K = \frac{D_p + \Theta}{S_{\bar{X}} + \sqrt{\sum_{i=1}^p \left(\frac{\Theta_i^2}{3} \right)}}.$$

7-й этап: запись результата измерения. Результат измерения записывается в виде $x = \bar{X} \pm \Delta_p$ при доверительной вероятности P .

При отсутствии данных о виде функции распределения, составляющих погрешности, результаты измерения представляют в виде \bar{X} , S , n , Θ при доверительной вероятности P .