

# 1. Классификация погрешностей измерений.

Прежде чем приводить общую классификацию погрешности следует отметить, что различным по назначению измерительным процедурам свойственны свои составляющие погрешности и причины их возникновения.

Как видно из схемы, показанной на рисунке 1, погрешность результата измерения возникает:

а) при воспроизведении размера единицы физической величины (в силу того, что технически невозможно создание абсолютно точных эталонов);

б) при передаче размера единицы физической величины (к основным процедурам передачи размера относят поверку, калибровку, аттестацию);

в) при аттестации (из-за несовершенства аттестационного оборудования, методик выполнения измерений и др.);

г) при поверке СИ (из-за несовершенства методов поверки и др.);

д) при градуировке (из-за несовершенства способов нанесения шкал, ошибок при построении градуировочных кривых и т. д.);

е) при рабочих измерениях (выполняемых рабочими СИ в лабораторных, полевых или других условиях);

ж) при статистической обработке результатов измерений.

По метрологическому назначению измерения делят на эталонные и рабочие.

Эталонные измерения выполняются с применением эталонов. Они широко применяются в практике поверочных и калибровочных работ, а так же при метрологической аттестации испытательного оборудования и СИ. Они связаны с воспроизведением и передачей размера единицы физической величины.

Эталон - это СИ (или комплекс СИ), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы физической величины. и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИ и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

Конструкция эталона, его свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной физической величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений.

Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя тесно связанными друг с другом существенными признаками — неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью. Эталоны делятся на первичные и вторичные. С помощью вторичных (рабочих разрядных) эталонов разными методами осуществляется поверка (калибровка) различных СИ.

- Рабочие измерения имеют место в повседневной измерительной практике определения значения измеряемой физической величины и не связаны с передачей размера ее единицы.

К рабочим относят и технические измерения – измерения параметров технологических процессов, показателей готовой продукции, оборудования и других параметров, несвязанных с передачей размера единицы величины.

### 1.1 Погрешность результата измерения.

Составляющие погрешности результата измерения представлены на рисунке 1.

По форме количественного выражения погрешности измерения делятся на абсолютные и относительные.

**Абсолютной погрешностью** ( $\Delta$ ), выражаемой в единицах измеряемой величины, называется отклонение результата измерения ( $x$ ) от истинного значения ( $X_{И}$ ), или действительного значения ( $X_{Д}$ ). Таким образом, формула (1) может быть применима для количественной оценки абсолютной погрешности.

$$\Delta x_{\text{ИЗМ}} = x_{\text{ИЗМ}} - X_{\text{Д}}, \quad (1)$$

где  $x_{\text{ИЗМ}}$  – измеренное значение величины.

● Абсолютная погрешность характеризует величину и знак, полученный погрешности, но не определяет качество самого проведенного измерения.

Понятие погрешности характеризует как бы несовершенство измерения. Характеристикой качества измерения является используемое в метрологии понятие точности измерений, отражающее, как было показано выше, меру близости результатов измерений к истинному значению измеряемой физической величины. Точность и погрешность связаны между собой обратной зависимостью. Иначе говоря, высокой точности измерений соответствует малая погрешность. Поэтому, чтобы иметь возможность сравнить качество измерений, введено понятие относительной погрешности.

**Относительной погрешностью** ( $\delta$ ) называется отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины. Она вычисляется по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta x_{\text{изм}}}{X_{\text{И}}(X_{\text{Д}})} . \quad (2)$$

Мерой точности измерений служит величина, обратная модулю относительной погрешности, т. е.  $\frac{1}{|\delta|}$ . Погрешность ( $\delta$ ) часто выражают в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta x_{\text{изм}}}{X_{\text{И}}(X_{\text{Д}})} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Если измерение выполнено однократно и за абсолютную погрешность результата измерения  $\Delta$  принята разность между показанием прибора и истинным значением принятой величины  $X_{и}$ , то из соотношения (3) следует, что значение относительной погрешности  $\delta$  уменьшается с ростом величины  $X_{и}$ . Поэтому для измерений целесообразно выбирать такой прибор, показания которого были бы в последней части его шкалы (диапазона измерений), а для сравнения различных приборов использовать понятие приведенной погрешности.

Рисунок 1.1 – Погрешность результата измерения, ее составляющие инструментальной погрешности (аппаратурной, приборной) - она будет рассмотрена ниже.

По характеру (закономерности) изменения погрешности измерений подразделяются на систематические и случайные. К числу случайных относят и грубые погрешности.



**Систематические погрешности** ( $\Delta_c$ ) - составляющие погрешности измерений, остающиеся постоянными или закономерно изменяющиеся при многократных (повторных) измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях. Из всех видов погрешностей, именно систематические, является наиболее опасными и трудно устранимыми. Это объяснимо по ряду причин:

Во-первых, она постоянно искажает действительное значение полученного результата измерения в сторону его увеличения или уменьшения. Причем, заранее направление такого искажения трудно определить.

Во-вторых, величина систематической погрешности не может быть найдена методами математической обработки полученных результатов измерения. Она не может быть уменьшена при многократном измерении одними и теми же измерительными средствами.

В-третьих, она может быть постоянной, может монотонно изменяться, она может изменяться периодически, но по полученным результатам измерения закон ее изменения трудно, а иногда и невозможно определить.

В-четвертых, на результат измерений влияют несколько факторов, каждый из которых вызывает свою систематическую погрешность в зависимости от условий измерения. Причем, каждый новый метод измерения может дать свои, заранее неизвестные систематические погрешности и надо искать приемы и способы исключения влияния этой систематической погрешности в процессе измерения. Утверждение об отсутствии систематической погрешности или, что она пренебрежительно мала – все это надо не просто показать, но и доказать.

Такие погрешности могут быть выявлены только путём детального анализа возможных их источников и уменьшены (применением более точных приборов, калибровкой приборов с помощью рабочих мер и пр.). Однако полностью их устранить нельзя.

Не следует забывать, что необнаруженная систематическая погрешность “опаснее” случайной. Если случайные погрешности характеризуют разброс величины измеряемого параметра относительно его действительного значения, то систематическая погрешность устойчиво искажает непосредственно величину измеряемого параметра, и тем самым “удаляет” его от истинного (или условно - истинного) значения. Иногда для обнаружения систематической погрешности приходится проводить трудоемкие и долговременные (до нескольких месяцев) эксперименты и в результате обнаружится, что систематическая погрешность была пренебрежительно мала. Это очень ценный результат. Он показывает, что данная методика измерения дает точные результаты за счет исключения систематической погрешности.



В реальных условиях полностью исключить систематическую составляющую погрешности невозможно. Всегда остаются какие-то не исключенные остатки, которые и нужно учитывать, чтобы оценить их границы. Это и будет систематическая погрешность измерения. То есть, в принципе, систематическая погрешность тоже случайна, и указанное деление обусловлено лишь установившимися традициями обработки и представления результатов измерения.

По характеру изменения во времени систематические погрешности подразделяются на постоянные (сохраняющие величину и знак), прогрессирующие (возрастающие или убывающие во времени), периодические, а также изменяющиеся во времени по сложному непериодическому закону. Основные из этих погрешностей – прогрессирующие.

Прогрессирующая (дрейфовая) погрешность – это непредсказуемая погрешность, медленно меняющаяся во времени. Отличительные особенности прогрессирующих погрешностей следующие:

а) их можно скорректировать поправками только в данный момент времени, а далее они вновь непредсказуемо меняются;

б) изменения прогрессирующих погрешностей во времени - нестационарных (характеристики которого изменяются во времени) представляют собой случайный процесс, и поэтому в рамках хорошо разработанной теории стационарных случайных процессов они могут быть описаны лишь с известными оговорками.

● По источникам проявления различают следующие систематические погрешности:

- методические, вызванные используемым методом измерения;
- инструментальные, вызванные погрешностью используемого СИ (определяются классом точности СИ);
- погрешности, вызванные неправильной установкой СИ или влиянием неинформативных внешних факторов;
- погрешности, вызванные неправильными действиями оператора (укоренившийся неверный навык проведения измерительной процедуры).

**Случайные погрешности** ( $\Delta$ ) - составляющие погрешности измерений, изменяющиеся случайным образом при повторных (многократных) измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях. В появлении таких погрешностей нет какой-либо закономерности, они проявляются при повторных измерениях одной и той же величины в виде некоторого разброса получаемых результатов. Практически случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда имеют место в результате измерения. Описание случайных погрешностей возможно только на основе теории случайных процессов и математической статистики.

В отличие от систематических случайные погрешности нельзя исключить из результатов измерений путём введения поправки, однако их можно существенно уменьшить путем многократного измерения этой величины и последующей статической обработкой полученных результатов.

Грубые погрешности (промахи) – погрешности, существенно превышающие ожидаемые при данных условиях измерения. Такие погрешности возникают из-за ошибок оператора или неучтенных внешних воздействий. Их выявляют при обработке результатов измерений и исключают из рассмотрения, пользуясь определенными правилами. Следует заметить, что отнесение результатов наблюдения к числу промахов не всегда может быть выполнено однозначно.

Следует учитывать два момента: с одной стороны, ограниченность числа выполненных наблюдений, не позволяющих с высокой степенью достоверности оценить форму и вид (провести идентификацию) закона распределения, а значит выбрать подходящие критерии оценки результата на наличие “промаха”. Второй момент связан с особенностями объекта (или процесса), показатели (параметры) которого образуют случайную совокупность (выборку). Так при медицинских исследованиях, и даже в повседневной медицинской практике отдельные выпадающие результаты могут представлять из себя вариант “биологической нормы”, и поэтому они требуют учета, с одной стороны, и анализа причин, которые приводят к их появлениям - с другой.

Обязательными компонентами любого измерения являются СИ (прибор, измерительная установка, измерительная система), метод измерения и человек, проводящий измерение. Несовершенство каждого из этих компонентов приводит к появлению своей составляющей погрешности результата измерения. В соответствии с этим, по источнику (причинам) возникновения различают инструментальные, методические и личные субъективные) погрешности.

**Инструментальные (аппаратурные, приборные) погрешности** возникают из-за несовершенства СИ, т. е. от погрешностей СИ. Источниками инструментальных погрешностей могут быть, например, неточная градуировка прибора и смещение нуля, вариация показаний прибора в процессе эксплуатации и т. д.

Точность СИ является характеристикой качества СИ и отражает близость его погрешности к нулю. Считается, что чем меньше погрешность, тем точнее СИ.

Обобщенной характеристикой данного типа СИ является его **класс точности**. Класс точности СИ, как правило, отражающий уровень их точности, выражается пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность. Говоря о классе точности, следует отметить два момента:

Класс точности дает возможность судить о том, в каких пределах находится погрешность СИ одного типа, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью каждого из этих средств. Это важно при выборе СИ в зависимости от заданной точности измерений.

Класс точности СИ конкретного типа устанавливаются в стандартах технических требований (условий) или в других НД.

Возможные составляющие инструментальной погрешности представлены на рисунке 2. Уменьшают инструментальные погрешности применением более точного прибора.

**Погрешность метода измерений** представляет собой составляющую систематической погрешности измерений, обусловленную несовершенством принятого метода измерений.

Погрешность метода измерения обусловлена:

- отличием принятой модели объекта измерения от модели, адекватно описывающей его свойство, которое определяется путём измерения (в этом выражается несовершенство метода измерения);

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

- влиянием алгоритмов (формул), по которым производят вычисления результатов измерений (например, некорректностью расчетных формул;
- влиянием выбранного СИ на параметры сигналов;
- влиянием других факторов, не связанных со свойствами используемых СИ.

Методические погрешности часто называют теоретическими, потому что они связаны с разного рода отклонениями от идеальной модели измерительного процесса и использования неверных теоретических предпосылок (допущений) при измерениях. Вследствие упрощений, принятых в уравнениях для измерений, нередко возникают существенные погрешности, для компенсации действия которых следует вводить поправки. Поправки по величине равны погрешности и противоположны ей по знаку.

Отдельно среди методических погрешностей выделяют **погрешности при статистической обработке результатов наблюдений**. Кроме погрешностей, связанных с округлением промежуточных и конечных результатов, они содержат погрешности, связанные с заменой точечных (числовых) и вероятностных характеристик измеряемых величин их приближенными (экспериментальными) значениями. Такие погрешности возникают при замене теоретического распределения опытным, что всегда имеет место при ограниченном числе наблюдаемых значений (результатов наблюдения).

Отличительной особенностью методических погрешностей является то, что они не могут быть указаны в документации на используемое СИ, поскольку от него не зависят; их должен определять оператор в каждом конкретном случае. В связи с этим оператор должен чётко различать фактически измеряемую им величину и величину, подлежащую измерению.

Иногда погрешность метода может проявляться как случайная. Если, например, электронный вольтметр обладает недостаточно высоким входным сопротивлением, то его подключение к исследуемой схеме способно изменить в ней распределение токов и напряжений. При этом результат измерения может существенно отличаться от действительного. Методическую погрешность можно уменьшить путём применения более точного метода измерения.

**Субъективная погрешность** - составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная индивидуальными особенностями оператора.

Субъективные погрешности вызываются ошибками оператора при отсчете показаний СИ. Согласно РМГ 29-99 погрешность оператора (субъективная погрешность) - погрешность, обусловленная погрешностью отсчета оператором показаний по шкале СИ, диаграммам регистрирующих приборов.

Она вызывается состоянием оператора, его положением во времени работы, несовершенством органов чувств, эргономическими свойствами СИ. Так имеют место погрешности от небрежности и невнимания оператора, от параллакса, т. е. от неправильного направления взгляда при отсчете показаний стрелочного прибора и пр.

Подобные погрешности устраняются применением современных цифровых приборов или автоматических методов измерения.

По характеру поведения измеряемой физической величины в процессе измерений различают статические и динамические погрешности.

**Статические погрешности** возникают при измерении установившегося значения измеряемой величины, т. е. когда эта величина перестает изменяться во времени.

**Динамические погрешности** имеют место при динамических измерениях, когда измеряемая величина изменяется во времени и требуется установить закон ее изменения, т. е. погрешности, свойственные условиям динамического измерения. Причина появления динамических погрешностей состоит в несоответствии скоростных (временных) характеристик прибора и скорости изменения измеряемой величины.

В зависимости от влияния измеряемой величины на характер накопления в процессе измерения погрешности, она может быть аддитивная или мультипликативная.



Во всех перечисленных случаях на результат измерения оказывают влияние условия измерений, они формируют погрешность от влияющих условий.

**Внешняя погрешность** - важная составляющая погрешности результата измерения, связанная с отклонением одной или нескольких влияющих величин от нормальных значений или выходом их за пределы нормальной области (например, влияние влажности, температуры, внешних электрических и магнитных полей, нестабильности источников питания, механических воздействий и т. д.). В большинстве случаев внешние погрешности являются систематическими и определяются дополнительными погрешностями применяемых СИ, в отличие от основной погрешности, полученной в нормальных условиях измерения.

Различают нормальные и рабочие значения влияющей величины. Значение влияющей величины, установленное в качестве номинального, принимают в качестве нормального значения влияющей величины. Так при измерении многих величин нормируется нормальное значение температуры 20 °С или 293 К, а в других случаях нормируется 296 К (23 °С). На нормальное значение, к которому приводятся результаты многих измерений, выполненные в разных условиях, обычно рассчитана основная погрешность СИ. Область значений влияющей величины, в пределах которой изменением результата измерений под ее воздействием можно пренебречь в соответствии с установленными нормами точности, принимается как нормальная область значений влияющей величины.

Например, нормальная область значений температуры при поверке нормальных элементов класса точности — 0,005 в термостате не должна изменяться более чем на  $\pm 0,05$  °С от установленной температуры 20 °С, т. е. быть в диапазоне от 19,95 до 20,05 °С. Область значений влияющей величины, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность или изменение показаний СИ принимается за рабочую область значений влияющей величины.

Изменение показаний СИ во времени, обусловленное изменением влияющих величин или других факторов называется дрейфом показаний СИ. Например, ход хронометра, определяемый как разность поправок к его показаниям, вычисленных в разное время. Обычно ход хронометра определяют за сутки (суточный ход). Если происходит дрейф показаний нуля, то применяют термин “дрейф нуля”.

Таким образом, погрешность от влияющих условия измерения следует рассматривать как составляющую систематической погрешности измерения, являющуюся следствием неучтенного влияния отклонений в одну сторону какого-либо из параметров, характеризующих условия измерений, от установленного значения.

Этот термин применяют в случае неучтенного или недостаточно учтенного действия той или иной влияющей величины. Однако, следует отметить что, погрешность от влияющих условий может проявляться и как случайная, если действующий фактор имеет случайную природу (таким образом проявляет себя температура помещения, в котором выполняются измерения).

## 1.2 Инструментальная погрешность измерения.

СИ при выполнении измерительной процедуры оказывает большое влияние на результирующую погрешность, которая, как было показано выше, всегда содержит погрешности случайного и систематического характера.

Инструментальная погрешность (рисунок 2), прежде всего, обусловлена несовершенством самого СИ. Поэтому при классификации составляющих инструментальной погрешности выделяют погрешность компонентов (составных частей СИ), она объясняется невозможностью абсолютно точного изготовления любого технического средства (к числу которых принадлежат СИ).

Деление погрешности на основную и дополнительную связано с условиями, в которых используются СИ.

Основная погрешность СИ – погрешность, которая имеет место при нормальных условиях его эксплуатации, оговоренных в регламентирующих документах (паспорте, технических условиях и пр.).

Дополнительная погрешность СИ возникает при отклонении условий эксплуатации от нормальных (номинальных). Данная погрешность, как и основная, указывается в НД.

- Форма выражения погрешности (абсолютная и относительная) относится как к погрешности результата измерения, так и к отдельным ее составляющим. Инструментальная погрешность, обусловленная погрешностью самого СИ, как сказано выше, выражается в приведенной форме.

**Приведённая погрешность** ( $\delta_{\text{пр}}$ ), %, выражающая потенциальную точность измерений, представляет собой отношение абсолютной погрешности ( $\Delta$ ) СИ к условно применяемому значению величины, постоянному во всем диапазоне измерений или в части диапазона. Условно принятое значение величины называют нормирующим значением. Часто за нормирующее значение применяют верхний предел измерений. Применима формула

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{100 \cdot \Delta}{X_N} (\%), \quad (4)$$

где  $X_N$  – некоторое нормирующее значение, в качестве нормирующего применяется верхний предел шкалы прибора (односторонняя) или диапазон измерений (двухсторонняя).

Чаще всего инструментальная погрешность носит систематический характер.

**Систематическая погрешность СИ** - это составляющая погрешности СИ, принимаемая за постоянную или закономерную изменяющуюся. Систематическая погрешность данного СИ, как правило, будет отличаться от систематической погрешности другого экземпляра СИ этого же типа, вследствие чего для группы однотипных СИ систематическая погрешность может иногда рассматриваться как случайная погрешность.

Систематическая погрешность СИ известна, если есть информация о его метрологических характеристиках (МХ). Она может быть получена из технической документации на СИ (если они стандартизованы). Для нестандартизованных СИ такую информацию о МХ получают при метрологической аттестации. При отсутствии такой информации, как было указано выше, возможна лишь приблизительная оценка погрешности результата измерений.

Под метрологической аттестацией согласно РМГ29-99 следует понимать признание метрологической службой узаконенным для применения СИ единичного производства (или ввозимого единичными экземплярами из-за границы) на основании тщательных исследований его свойств. Метрологической аттестации могут подлежать СИ, не подпадающие под сферы распространения государственного метрологического контроля или надзора.



Рисунок 2 – Инструментальная погрешность и ее составляющие.

Задача оценки эффективности СИ при одно- и многократном измерениях в пособии решена в предположении отсутствия систематической составляющей погрешности. Поэтому при любом наблюдении предполагается, что существует композиция двух законов распределения погрешностей: погрешности отсчета, распределенной равномерно в диапазоне цены деления прибора  $\pm\Delta x/2$ , и случайной погрешности, имеющей СКО  $\sigma$  нормального распределения (заменяемую, в случае ограниченного числа наблюдений, оценкой СКО  $s$ ). Если  $\Delta x/(2\sigma) = 2,5 \div 3,5$ , то можно проводить однократные измерения, так как мала вероятность того, что случайная составляющая погрешности будет иметь значение, большее половины цены деления СИ.

Для измерения с многократными наблюдениями можно использовать СИ с менее совершенными элементами схемы, обладающее значительной случайной составляющей погрешности, но более чувствительное. При этом  $\Delta x/(2\sigma) = 1 \div 0,25$ . Такое СИ неудобно для однократных наблюдений из-за высокой вероятности погрешности, превышающей половину цены деления прибора. Однако результаты многократных измерений, выполненные одним и тем же СИ, целесообразно обработать, усреднить и таким образом снизить случайные погрешности результатов наблюдений.

**Случайная погрешность СИ** по это составляющая погрешности СИ, изменяющаяся случайным образом. Она приводит к разбросу показаний, выполненных в одних и тех же условиях. В этом случае говорят о вариации показаний.

**Вариация показаний измерительного прибора** - это разность показаний прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

В высокочувствительных (особенно в электронных) измерительных приборах вариация приобретает иной смысл и может быть раскрыта как колебание его показаний около среднего значения (показание “дышит”).

Вариация (гистерезис) определяется как разность между показаниями СИ в данной точке диапазона измерения при возрастании и убывании измерений величины и неизменных внешних условиях:

$$H = X_B - X_Y ,$$

где  $X_B$ ,  $X_Y$  - значения измерений эталонными СИ при возрастании и убывании величины  $X$ .



Следует иметь в виду, что, хотя вариация показаний СИ вызывается случайными факторами, сама она – не случайная величина. Зависимость между выходным и входным сигналом СИ, полученную экспериментально, называют градуировочной характеристикой, которая может быть представлена аналитически, графически или в виде таблицы.

Градуировочная характеристика может изменяться под воздействием внешних и внутренних причин. Например, при быстром изменении тока подвижная часть СИ, вследствие инерции, не успевает “следить” за изменением тока. Градуировочная характеристика в этом случае должна выражаться дифференциальным уравнением.

**Погрешность СИ** – разность между показаниями СИ и истинным значением измеряемой физической величины.

Поскольку истинное значение физической величины неизвестно, то на практике (как показано выше) пользуются ее действительным значением.

**Погрешность меры** – разность между номинальным значением меры и действительным значением воспроизводимой ею величины.

Кроме этого, различают погрешности, относящиеся к выполнению метрологических процедур воспроизведения и передачи размера единицы физической величины.

**Под погрешностью воспроизведения единицы физической величины** понимается погрешность результата измерений, выполняемых при воспроизведении единицы физической величины.

Следует отметить, что погрешность воспроизведения единицы при помощи государственных эталонов обычно указывают в виде ее составляющих: не исключенной систематической погрешности; случайной погрешности; нестабильности за год.

Различают так же **погрешность передачи размера единицы физической величины**, под которой понимают погрешность результата измерений, выполняемых при передаче размера единицы.

В погрешность передачи размера единицы входят как не исключенные систематические, так и случайные погрешности метода и СИ.

**Погрешность поверки** – погрешность применяемого метода передачи размера единицы физической величины, осуществляемого при сравнении показаний поверяемого и эталонного приборов. Не рекомендуется заменять друг другом термины “поверка” и “калибровка”.

Следует отметить, что в практике поверочных работ, в силу того, что трудно выделить погрешности от изменяющихся условий поверку выполняют в нормальных условиях измерения.

Как метрологическая процедура, носящая юридический характер, поверка распространяется на все СИ, подлежащие Государственному метрологическому контролю и надзору. Калибровке подвергаются все остальные СИ, используемые для измерения в процессе производства, оказания услуг. Владелец этих СИ согласно Закона “Об обеспечении единства измерений” сам поддерживает надежность и их метрологические характеристики в период эксплуатации (так называемый межкалибровочный интервал).

С точки зрения терминологии, определяемой в РМГ 29-99 погрешность поверки (калибровки) - это отклонение в показаниях поверяемого (калибруемого) СИ - прибора или измерительной системы от показаний эталонного СИ.

Разница заключается в назначении метрологических требований к самой процедуре. При выполнении поверочных работ эти требования должны быть выше. Именно этим и определяется более высокий метрологический статус поверки.

Это связано с тем, что поверку проводят в соответствии с обязательными требованиями, установленными НД по поверке (ГОСТ или ТУ на поверяемое СИ, а так же ГОСТ, МИ, ПИ, МВИ на методы и средства поверки). Если при поверке выявлено несоответствие обязательным требованиям перечисленных в НД, то поверяемое СИ бракуется (т. е. изымается из эксплуатации у его владельца). Возможны так же ремонт или юстировка с повторной поверкой этого СИ.

Поверку проводят специально обученные специалисты, аттестованные в качестве поверителей органами Государственной метрологической службы.

Результаты поверки СИ, признанных годными к применению, оформляют выдачей свидетельства о поверке, нанесением поверительного клейма или иными способами, установленными НД по поверке

Целью же калибровки является оценка метрологических характеристик СИ. При этом результаты калибровки позволяют определить действительные значения измеряемой величины, показываемые СИ, или поправки к его показаниям. Может быть поставлена задача оценки погрешности этих СИ. При калибровке могут быть определены и другие метрологические характеристики.

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

**Погрешность градуировки** – погрешность действительного значения величины, приписанного той или иной отметке шкалы СИ в результате градуировки. Как процедуру определения погрешности действительного значения по эталонному значению стандартного образца или вещества различают погрешность калибровки.

**Погрешность квантования** – методическая погрешность отражения непрерывной величины ограниченным по числу разрядов числом. Она равна разности между значением непрерывной функции и значением, получаемым в результате квантования.

Статический и динамический режимы работы СИ позволяют различать одноименные погрешности.

**Статическая погрешность СИ** это погрешность СИ, применяемого при измерении физической величины, принимаемой за неизменную.

**Динамическая составляющая погрешности** возникает при работе СИ в динамическом режиме и определяются двумя факторами: динамическими (инерционными) свойствами СИ и характером (скоростью) изменения измеряемой величины. При измерениях детерминированных сигналов динамические погрешности обычно рассматриваются как систематические. При случайном характере измеряемой величины динамические погрешности приходится рассматривать как случайные.

У СИ часто можно выделить составляющие погрешности, не зависящие от значения измеряемой величины и погрешности, изменяющиеся пропорционально измеряемой величине. Такие составляющие называют, соответственно, **аддитивными и мультипликативными погрешностями**. Аддитивной, например, является систематическая погрешность, вызванная неточной установкой нуля и стрелочного прибора с равномерной шкалой; мультипликативной – погрешность измерения отрезков времени отстающими или спешащими часами. Эта погрешность будет возрастать по абсолютной величине до тех пор, пока владелец часов не выставит их правильно по сигналам точного времени. Такая операция называется градуированием погрешности.

Заканчивая анализ классификации погрешностей измерений, необходимо отметить, что она (как любая другая классификация) носит достаточно условный (относительный) характер.

Ответы на вопросы об отнесении погрешности косвенного измерения к тем или иным классам и о делении их на случайные и систематические могут быть даны лишь при наличии полной информации о свойствах, параметрах и характеристиках измеряемого объекта, измерительных устройств, условий, в которых проводились измерения. Это возможно, как правило, только после проведения многочисленно повторенных (т. е. многократных) измерений.

В частности, при изготовлении измерительных мостов, разброс сопротивлений его резисторов можно отнести к случайным погрешностям, в то время как в конкретном собранном мосте этот разброс следует отнести к систематическим погрешностям измерительного моста.

Другим наглядным примером может служить **климатическая погрешность** измерительного прибора. Если возможен контроль температуры, при которой проводятся измерения, и имеется поправочная таблица, то такую погрешность следует рассматривать как систематическую. Однако, при отсутствии контроля температур, эта же погрешность учитывается как случайная.

Согласно МИ 1317-86, если группы характеристик погрешности измерений заданы в качестве требуемых или допускаемых, то их называют нормы характеристик погрешностей измерений (или, кратко, нормы погрешностей измерений).

Если группы характеристик погрешности, приписаны совокупности измерений, выполняемых по определенной (стандартизованной или аттестованной) методике, то их называют приписанные характеристики погрешности измерений.

Кроме этого различают статистические оценки характеристик погрешностей измерений (или, кратко, статистические оценки погрешностей измерений), отражающие близость отдельного, экспериментально уже полученного результата измерения к истинному значению измеряемой величины. При массовых технических измерениях, выполняемых при технологической подготовке производства, в процессах разработки, испытаний, производства, контроля и эксплуатации (потребления) продукции, при товарообмене, торговле и др., применяются, в основном, нормы погрешностей измерений, а также приписанные характеристики погрешности измерений. Они представляют собой вероятностные характеристики (характеристики генеральной совокупности) случайной величины — погрешности измерений.

При измерениях, выполняемых при проведении научных исследований и метрологических работ (определение физических констант, свойств и состава, стандартных образцов, аттестации СИ и т. п.), часто применяются статистические оценки погрешности измерений. Они представляют собой статистические (выборочные) характеристики случайной величины — погрешности измерений.

В пособии рассматриваются вероятностные характеристики (и их статистические оценки) погрешности результата измерений. К ним относятся выборочное среднее квадратическое отклонение погрешности измерений или границы, в пределах которых погрешность измерений находится с заданной вероятностью (чаще с вероятностями  $P=0,95$   $P=0,99$ ), а так же характеристики случайной и систематической составляющих погрешности измерений. Причем, возможны случаи, когда границы погрешности измерений определяются с вероятностью, равной единице.

Математическое ожидание погрешности измерений, как было указано выше, может быть использовано в качестве принятого опорного значения, так как оно представляет собой систематическую погрешность. Если ее значение известно и постоянно, то на нее в результат измерений вводится поправка. В других случаях используются характеристики не исключенной систематической погрешности.



В качестве характеристик случайной составляющей погрешности используются среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерений и (при необходимости) нормализованная автокорреляционная функция случайной составляющей погрешности измерений или характеристики этой функции.

В качестве характеристик систематической составляющей погрешности измерений используются среднее квадратическое отклонение не исключенной систематической составляющей погрешности измерений или границы, в которых не исключенная систематическая составляющая погрешности измерений находится с заданной вероятностью (в частности, и с вероятностью, равной единице).

В качестве статистических (выборочных) оценок погрешности измерений используются результаты экспериментального или расчетно-экспериментального оценивания характеристик среднего квадратического отклонения, границ, в пределах которых погрешность измерения находится с заданной вероятностью, а также характеристик случайной и систематической составляющих погрешности измерений.

Следует также отметить, что вместо термина среднее квадратическое отклонение ( $S$ ) РМГ 29-99 рекомендует применять термин средняя квадратическая погрешность результатов единичных измерений в ряду измерений (или кратко, средняя квадратическая погрешность измерений).

● Это есть оценка ( $S$ ) рассеяния единичных (однократных) результатов измерений в ряду равноточных измерений одной и той же физической величины около среднего их значения, вычисляемая по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (5)$$

где  $x_i$  – результат  $i$ -го единичного измерения;

$\bar{X}$  - среднее арифметическое значение измеряемой величины  $n$  единичных результатов.

Под оценкой параметра (числовых характеристик) законов распределения принято понимать приближенное их значение, при статистической обработке ограниченного числа случайной величины. К числу которой, как известно, относят и физическую величину.

Учитывая, с одной стороны, что под отклонением в соответствии с формулами (2), (5) понимают отклонение единичных (отдельных) результатов в ряду измерений от их среднего арифметического значения, а саму эту величину определяют как погрешность измерения. А, с другой стороны, если учесть, что в результаты измерений введены поправки на действие систематических погрешностей, то отклонения представляют собой случайные погрешности. Поэтому с точки зрения упорядочения совокупности терминов, родовым среди которых является термин “погрешность измерения”, целесообразно применять термин “средняя квадратическая погрешность”.

● При обработке ряда результатов измерений, свободных от систематических погрешностей, СКП и СКО являются одинаковой оценкой рассеяния результатов единичных измерений (однократных наблюдений).

Погрешность результата измерений всегда известна с некоторой доверительной вероятностью и существуют ее доверительные границы. Под которыми понимают наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений.

Доверительные границы в случае нормального закона распределения вычисляются как  $\pm tS$ ,  $\pm tS_{\bar{X}}$ , где  $S$ ,  $S_{\bar{X}}$  - средние квадратические погрешности, соответственно, единичного и среднего арифметического результатов измерений;  $t$  - коэффициент, зависящий от доверительной вероятности  $P$  и числа измерений  $n$ .

При симметричных границах термин может применяться в единственном числе — доверительная граница. Иногда вместо термина доверительная граница применяют термин доверительная погрешность или погрешность при данной доверительной вероятности.

В РМГ 29-99 нормируется так же и предельная погрешность измерения в ряду измерений. Предельная погрешность измерения - это максимальная погрешность измерения (плюс, минус), допускаемая для данной измерительной задачи.

- Во многих случаях погрешность  $3S$  принимают за предельную, то есть  $\Delta_{пр} = \pm 3S$ . При необходимости за предельную погрешность может быть принято и другое значение границ погрешности (в зависимости от формы и вида закона распределения).

Результат измерения всегда содержит погрешности систематического и случайного характера.

Показание СИ при любых измерениях можно представить в виде:

$$x_i = x_d + \dot{\Delta} + \theta, \quad (6)$$

где  $x_i$  – единичное (отдельное) показание СИ;

$x_d$  – действительное значение измеряемого параметра;

$\dot{\Delta}$  – случайная составляющая погрешности;

$\theta$  – систематическая составляющая погрешности.

Многократные измерения целесообразно применять, если необходимо получение статистической информации об объекте или процессе. Это имеет место в ходе статистического контроля, когда на основе статистических оценок принимается решение об изменении или сохранении плана контроля или о необходимости вмешательства в процесс производства с целью снижения входного уровня дефектности. В количественном химическом анализе многократные измерения применяются для построения калибровочных и

- При проверке нулевого показания микрометрических измерительных инструментов с целью определения аддитивной погрешности так же необходимо применять многократные измерения.

При многократных измерениях среднее значение измеряемой величины (принимаемое за результат измерения при условии распределения погрешностей измерения по нормальному закону) при  $n$  наблюдениях имеет вид:

$$\bar{X} = x_0 + \theta + \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i . \quad (7)$$

Из приведенного соотношения видно, что при измерениях с многократными наблюдениями за счет увеличения числа наблюдений  $n$  происходит лишь уменьшение случайной составляющей погрешности.

На практике до проведения измерений стремятся максимально уменьшить систематическую составляющую погрешности.

При многократных измерениях результат измерения получают в итоге обработки результатов наблюдений, что позволяет уменьшить случайную погрешность. При этом следует отдавать отчет в том, что трудоемкость и время измерений возрастают, поэтому количество наблюдений  $n$  должно быть обосновано исходя из требуемой точности измерений. Точность измерений, в свою очередь, определяется поставленной измерительной задачей (целью измерительного эксперимента).