

1. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Понятие погрешности

Понятие точности является основополагающим понятием метрологии, характеризующим качество любого измерения. Точность характеризует близость к нулю погрешности результата измерения. Количественной оценкой точности является погрешность.

Абсолютная погрешность результата измерения – это разница между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины. Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой физической величины

$$\Delta x = x - x_{\text{и}}, \quad (1.1)$$

где: x – результат измерения, $x_{\text{и}}$ – истинное значение измеряемой физической величины.

Так как, истинное значение измеряемой величины не известно, на практике используют *действительное значение* x_0 этой величины, под которым подразумевается значение, найденное экспериментально настолько близкое к истинному, что может использоваться вместо него.

$$\Delta x = x - x_0,$$

В случае если x – показания измерительного средства, то Δx характеризует *погрешность средства измерения* равную разности между показаниями средства измерения и действительным значением измеряемой физической величины.

Определить абсолютную погрешность результата измерения точно нельзя, т.к. в этом случае возможно определение истинного значения. Используя соответствующие метрологические характеристики средства измерения можно оценить предельные значения абсолютной погрешности в виде $\pm \Delta x$ и из (1.1) определить границы интервала, в котором находится истинное значение измеряемой величины относительно результата измерения x

$$x_{\text{и}} = x \pm \Delta x.$$

Этот интервал наглядно представлен на рис. 1.1

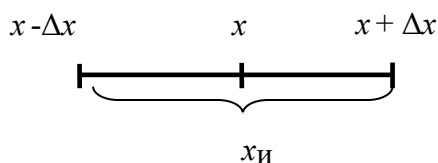


Рисунок 1.1

Вопросы задания метрологических характеристик средств измерений и оценивания погрешности измерений являются основными и будут рассматриваться на протяжении всего изучения данного курса.

1.2. Классификация погрешностей

Само понятие погрешность уже рассматривалось выше, в этом разделе хотелось бы остановиться на том, какие виды погрешностей существуют.

Погрешности классифицируются по неким признакам. Обобщенная классификация погрешностей приведена на рис. 1.2. Рассмотрим основные признаки классификации погрешностей.

По способу представления погрешности выделяют:

Абсолютная погрешность соответствует определению (1.1) и выражается в единицах измеряемой физической величины.

Относительная погрешность определяется как отношение абсолютной погрешности к истинному x или действительному значению x_d измеряемой физической величины x

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_{\text{и}}} 100 \approx \frac{\Delta x}{x_d} 100 \quad (\%) \quad (1.2)$$

Относительная погрешность является безразмерной величиной, которая, выражается в процентах. Она наглядно отражает точность измерения заданной величины и используется при сравнении результатов измерений.

Для характеристики средств измерения относительная погрешность не удобна, так как она может меняться от достаточно больших значений, если измерения осуществляются в начале шкалы прибора – в области нуля, до меньших – в конце шкалы. Поэтому используется погрешность, приведенная к диапазону измерений измерительного средства – *приведенная погрешность*

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} 100 \quad (\%), \quad (1.3)$$

где x_N – нормирующее значение, определение которого будет рассмотрено в теме 6.

Приведенная погрешность – безразмерная величина, выраженная в процентах. Она является метрологической характеристикой измерительного средства и может служить основой для определения его класса точности. Класс точности используется для определения погрешности результата измерения полученного с помощью данного измерительного средства.



Рисунок 1.2

По причине возникновения погрешности различают:

Методическая погрешность – погрешность, которая возникает в результате некоторых допущений, упрощений, аппроксимации функциональных зависимостей и др. при выборе принципа (метода) измерения. Методическая погрешность обусловлена:

- отличием принятой модели объекта измерения от модели, адекватно описывающей его свойства (*погрешность неадекватности*), которое может быть установлено с помощью измерительного эксперимента;
- выбором метода аналого-цифрового преобразования для цифровых измерительных средств.
- влиянием алгоритмов, по которым производятся вычисления результатов измерений (например, алгоритмы нормализации, масштабирования, функционального преобразования для получения результата в цифровых измерительных приборах).

Инструментальная погрешность – погрешность, которая определяется несовершенством аппаратной реализации измерительного средства. Эта погрешность зависит от структуры устройства, характеристик электронных элементов схемы, таких как дрейф нуля усилителя, шумов в линиях передачи и контактных соединениях, других особенностей реализации.

Выделение методической и инструментальной составляющих является важным при планировании структуры измерительного эксперимента, при проектировании измерительных устройств, измерительных каналов и систем.

По влиянию внешних факторов на результаты измерений различают:

Дополнительная погрешность или погрешность от влияющих факторов – это составляющая полной погрешности измерения связанная с воздействием внешних факторов на работу измерительных средств при эксплуатации в условиях отличных от нормальных. Дополнительная погрешность появляется в результате отклонения одной или нескольких влияющих физических величин от нормального значения и выхода ее из области нормальных значений (наиболее распространенные физические величины, оказывающие воздействие: температура, влажность, давление, магнитные и электромагнитные поля, вибрации и др.).

Основная погрешность – погрешность средства измерения при его эксплуатации в нормальных условиях и статическом режиме.

Дополнительная и основная погрешности могут носить как систематический, так и случайный характер.

В зависимости от характера изменения погрешности при повторных измерениях различают:

Систематическая погрешность – это составляющая погрешности измерения, величина которой остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная погрешность – это составляющая погрешности измерения, величина которой изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины $\Delta_{сл}$. Причины возникновения систематической и случайной составляющих погрешности измерения перечислены выше. При обработке результата измерения систематическая и случайная составляющая суммируются $\Delta = \Delta_{сист} + \Delta_{сл}$.

Погрешности, обусловленные с резким отклонением результата измерения от действительного значения при воздействии внешних факторов, изменении условий измерительного эксперимента, нарушении плана эксперимента называются *промахами*.

В зависимости от характера изменения измеряемой величины различают:

Статическая погрешность – это погрешность измерения физической величины, для которой принята гипотеза о неизменности во времени, т.е. постоянной физической величины.

Динамическая погрешность – это погрешность, которая возникает дополнительно при измерении физической величины изменяющейся во времени. Динамическая погрешность обусловлена несоответствием показаний измерительного прибора значениям изменяющейся во времени физической величины за счет его инерционности или времени получения результата измерения.

В результат измерения входит сумма статической и динамической составляющих $\Delta = \Delta_{ст} + \Delta_{д}$.

В зависимости от характера изменения абсолютной погрешности по диапазону измерения различают: аддитивную и мультипликативную погрешности.

Аддитивной называют погрешность, абсолютное значение которой неизменно во всем диапазоне измеряемой величины.

Примером систематической аддитивной погрешности может служить погрешность от неточной установки прибора на 0. Аддитивную погрешность еще называют погрешностью нуля.

Мультипликативной называют погрешность, абсолютное значение которой изменяется пропорционально измеряемой величине.

Погрешность конкретного средства измерения включает обе составляющих и в этом случае называется аддитивно-мультипликативной и выражается в виде

$$\Delta x = \pm (\Delta x_a + \Delta x_m) = \pm (a + bx),$$

где a – аддитивная составляющая погрешности; bx – мультипликативная составляющая погрешности.

2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1 Оценка погрешности измерения

Результатом измерения является некоторое числовое значение измеряемой физической величины, выраженное в единицах этой величины, полученное с погрешностью, которая определяется наряду с методической погрешностью метрологическими характеристиками средства измерения. Основной метрологической характеристикой средства измерения является класс точности.

Класс точности средства измерений – обобщенная метрологическая характеристика, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, а также другими свойствами средства измерений, влияющими на

точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Класс точности используется для оценки пределов основной погрешности, которые могут быть выражены в форме приведенной, относительной или абсолютной погрешностей. Это зависит от характера изменения погрешностей средства измерений в пределах диапазона измерений, а также от условий его применения и назначения.

Примеры обозначения классов точности и формулы для оценки пределов основной погрешности приведены в табл. 2.1.

Зная класс точности измерительного средства можно определить предельное значение допускаемой основной погрешности Δx . В этом случае можно утверждать, что истинное значение измеряемой физической величины находится в интервале

$$x_{\text{и}} = x \pm \Delta x, \quad (2.1),$$

где x – показание измерительного средства.

Таблица 2.1

Формулы для определения пределов допускаемой основной погрешности СИ: γ - приведенной (%); δ - относительной (%).	Формулы для оценки пределов абсолютной погрешности результата измерения	Примеры обозначения класса точности на средствах измерений и в нормативной документации (указывают числа для p, q, c, d)
$\gamma = \frac{\Delta x}{x_N} 100 = \pm p$	$\Delta x = \pm \frac{p x_N}{100}$	0,5
$\delta = \frac{\Delta x}{x} 100 = \pm q \%$	$\Delta x = \pm \frac{q x}{100}$	Ⓐ
$\delta = \pm [c + d (\frac{x_K}{x} - 1)] \%$	$\Delta x = \pm \frac{\delta x}{100}$	0,05/0,02

2.1. Правила округления погрешностей

Приведенное выше выражение (2.1) является оценкой интервала, в котором находится истинное значение измеряемой величины. Это выражение получено на основе оценки пределов абсолютной погрешности результата измерения, которую можно вычислить по приведенным в табл. 2.1 формулам. При вычислении получаемые значения могут содержать большое число цифр, что создает впечатление о высокой точности измерений. Возникает задача округления значений абсолютной погрешности до определенного числа значащих цифр, которые являются достоверными.

Рассмотрим, какие правила надо соблюдать для корректного представления результатов измерения. Определим понятие значащих цифр, которыми при записи приближенного числа после округления считаются:

- все ненулевые цифры;
- нули, содержащиеся между ненулевыми цифрами;
- нули, являющиеся представителями сохраненных десятичных разрядов при округлении.

При записи результата измерения в виде соотношения (2.1) используются следующие правила округления:

1. Погрешность оценки измеряемой величины следует выражать не более чем двумя значащими цифрами.
2. Погрешность результата измерения указывается двумя значащими цифрами, если первая из них 1 или 2 и одной, если первая цифра равна или более 3.
3. Число цифр в промежуточных вычислениях при обработке результатов измерений должно быть на две больше, чем в окончательном результате.
4. Погрешность при промежуточных вычислениях должна быть выражена не более чем тремя значащими цифрами.
5. Сохраняемую значащую цифру в погрешности оценки измеряемой величины при округлении увеличивают на единицу, если отбрасываемая цифра не указываемого младшего разряда больше либо равна пяти, и не изменяют, если она меньше пяти.
6. Результат измерения округляется до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то нули отбрасываются до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.

3. ПОГРЕШНОСТЬ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ

Метрология как любая наука развивается и отражает потребности современного этапа развития науки и общественного производства. На современном этапе это нашло отражение в новом подходе к оценке основного понятия метрологии – точности результатов измерения. Появилось понятие неопределенности измерения, которое наряду с классическим понятием погрешности будет рассмотрено ниже. Оба термина – *погрешность* и *неопределенность* измерения выражают в разных терминах одно и то же понятие – *точность измерения*.

В России исторически при оценке достоверности произведенного измерения используется погрешность. Как уже упоминалось выше, термин погрешность привязан к истинному значению измеряемой величины, которое неизвестно. На практике погрешность определяется как разность между результатом измерения и действительным значением измеряемой величины, применяемым вместо истинного. Таким образом, погрешность имеет единственное значение. В принципе, значение известной погрешности можно учесть, как поправку к результату измерения.

В международной практике часто используют понятие неопределенности (англ. *uncertainty*) для характеристики точности результата измерения. Межгосударственный стандарт ГОСТ 34100.3-2017 [2] дает следующее определение:

неопределенность – это параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий разброс значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине.

Поясним понятие неопределенность. Если измерять одну и ту же величину несколько раз в одинаковых условиях, то, как правило, результаты будут разными вследствие неадекватности принятой модели объекта измерения, случайной погрешности средств измерения, помех др. Неопределенность измерений понимают как неполное знание значений измеряемой величины и для количественного выражения этой неполноты вводят распределение вероятностей возможных (обоснованно приписанных значений) измеряемой величины. Таким образом, параметр этого распределения – неопределенность, количественно характеризует точность результата измерения.

Принципиальное отличие неопределенности от погрешности следующие:

- неопределенность привязана к измеренному значению величины, а не к ее абстрактному истинному значению;
- неопределенность принимает форму интервала значений;
- значение неопределенности не может быть использовано для исправления результатов измерения.

Неопределенность измерения включает множество составляющих [2]. Некоторые из этих составляющих могут быть оценены на основе статистического распределения результатов ряда наблюдений (неопределенность типа А) и охарактеризованы своими стандартными отклонениями (среднее квадратичное отклонение СКО). Другие составляющие оценивают на основании предполагаемых рас-

пределений вероятностей, основанных на опыте или иной информации (неопределенность типа Б) и также могут быть выражены в виде стандартного отклонения.

Результат измерения, как и для погрешности, записывается в виде интервала

$$x = A \pm U,$$

где P – заданная вероятность P , A – измеренное значение, U – неопределенности измерения.

Графически интервал, в котором с вероятностью P находятся значения, которые могли бы быть обоснованно приписаны к измеряемой величине x (ее возможные значения) представлен на рис.3.1:

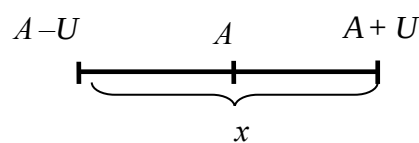


Рисунок. 3.1

Сравните рис. 1.1 (где фигурирует истинное значение $x_{и}$) и рис. 1.3 (где не используется истинное значение).

Оценив неопределенность, можно прогнозировать результаты последующих измерений: с некоторой вероятностью мы можем ожидать, что они окажутся в пределах области значений (см. рис.3.1), размеры которой характеризуются рассчитанной нами неопределенностью. Оценка неопределенности измерения будет рассмотрена далее в ходе изложения курса.

В табл. 3.1 приведены термины, являющиеся примерными аналогами концепции неопределенности измерения и классической теории точности.

Таблица 3.1

Классическая теория	Концепция неопределенности
Погрешность результата измерения	Неопределенность результата измерения
Случайная погрешность	Неопределенность, оцениваемая по тилу А
Неисключенная систематическая погрешность	Неопределенность, оцениваемая по типу Б
СКО (стандартное отклонение) погрешности результата измерения	Стандартная неопределенность результата измерения
Доверительные границы результата измерения	Расширенная неопределенность результата измерения
Доверительная вероятность	Вероятность охвата (покрытия)
Квантиль (коэффициент) распределения погрешности	Коэффициент охвата (покрытия)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Метрология, стандартизация и сертификация. Учебник для вузов /Б.Я. Авдеев, В.В. Алексеев, Е.М. Антонюк и др. Под редакцией В.В. Алексеева. М.: Академия, 2007.
2. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008/Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.