

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ НОРМИРОВАНИЕ

1. ВИДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для выбора средств измерений (СИ) при решении конкретных задач измерений, а также оценки погрешностей их результатов необходимо располагать соответствующими характеристиками, которые можно разделить на два вида: метрологические и неметрологические (см. рис. 1.1). Важнейшими характеристиками СИ являются метрологические характеристики (МХ) СИ.



Метрологическая характеристика средства измерений – характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений и на его погрешность. Совокупность МХ оказывает существенное влияние на результат и погрешность измерений и во многом определяет возможности использования СИ при решении тех или иных измерительных задач.

Для СИ важными являются также *неметрологические* (технические, эксплуатационные) характеристики, которые не влияют на результаты измерений: габариты, вес, надежность, потребляемая мощность и др.

В общем случае применение СИ в реальных условиях можно представить в следующем виде (см. рис. 1.2). Измерение происходит при определенных внешних условиях, которые оказывают влияние на результат измерения, что проявляется изменением выходной величины СИ y или показаний прибора α . Внешние условия можно характеризовать совокупностью влияющих факторов: $\xi_1 \dots \xi_n$, к которым относятся, например, температура, внешнее электромагнитное поле и т.д.

Различают несколько групп МХ, объединенных своим назначением:

1. МХ, предназначенные для определения результатов измерений;
2. МХ основной погрешности средства измерений;
3. МХ чувствительности средства измерений к влияющим величинам;
4. МХ влияния средства измерения на измеряемую величину;
5. Динамические характеристики средства измерения;
6. Неинформативные параметры сигналов измерительной информации.

Виды МХ будут рассмотрены ниже.

2. НОРМИРОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Метрологические свойства конкретных СИ (типов приборов, отдельных экземпляров и т. п.) должны быть представлены необходимой совокупностью МХ с определенными числовыми значениями их параметров. Такое представление реализуется путем нормирования МХ СИ.

Нормирование – установление номинальных значений МХ для данного типа СИ и допускаемых границ их отклонений для конкретного экземпляра СИ.

При нормировании МХ для типа (множества) СИ устанавливается некоторая единая, усредненная по множеству приборов, номинальная характеристика. Установление номинальных МХ связано с идеализацией, присущей любой модели реальной характеристики, а для типа приборов и с усреднением характеристик по множеству СИ данного типа.

Номинальные характеристики и пределы допускаемых отклонений представляют в виде чисел, формул, таблиц, графиков.

Если МХ СИ представлена в виде некоторой функции от измеряемой величины, например, функция преобразования, то задают допустимые отклонения реальной характеристики от номинальной.

Так, представление номинальной статической характеристики преобразования $y = F(x)$ в виде линейной функции с конкретными параметрами является идеализацией реальной. При этом реальная характеристика может иметь другие параметры или быть даже нелинейной. Важным здесь является установление допускаемых границ отклонений реальных МХ от номинальных.

Если МХ представляет некоторый параметр, например входное сопротивление прибора, то для него указывает граничные значения для этого параметра.

В общем случае процедура нормирования МХ включает:

- выбор комплекса МХ для типа СИ (или для отдельных средств);
- определение способов оценки МХ;
- выбор способа представления МХ.

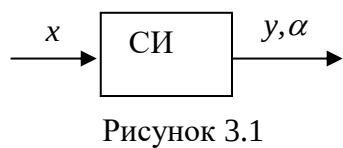
Такая процедура предназначена для разработчиков и изготовителей средств измерений, а также для служб метрологической поверки характеристик этих средств.

Выбор комплекса МХ подчинен задаче определения такой совокупности характеристик, которая позволяет определять результаты и погрешности измерений средствами данного типа. Способы оценки МХ оговариваются в соответствующей

щих государственных стандартах на СИ, утвержденных государственными метрологическими службами. Сведения по МХ на СИ приводят в соответствующей *нормативно-технической документации* (описаниях, паспортах и других документах), а часть из них указывают на самих средствах.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В общем случае применение СИ можно представить в следующем виде (см. рис. 3.1). На рис. 3.1 приняты следующие обозначения: СИ – средство измерений,



x – обобщенное обозначение входного воздействия (инвариантное к конкретной измеряемой величине – I , U , P и т. п.), y – выходной сигнал, или сигнал измерительной информации; в том случае, если необходимо подчеркнуть, что выходной сигнал является визуально наблюдаемым обычно используют

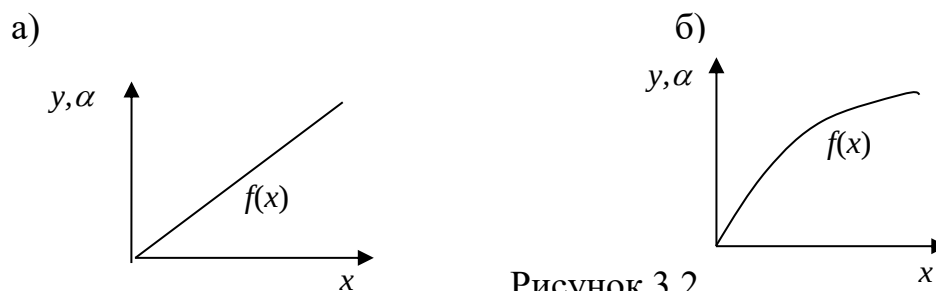
в качестве обозначения выходного сигнала греческую букву « α ».

Функция преобразования измерительного преобразователя или прибора $f(x)$ устанавливает связь между информативными параметрами выходной y и входной величин x :

$$y = f(x).$$

Форма представления функции преобразования может быть различной: в виде аналитической зависимости, в виде таблиц или в виде графиков.

На рис. 3.2 в качестве примеров показаны: а) линейная функция преобразования; б) нелинейная функция преобразования.



Примерами аналитической формы представления функции преобразования могут служить зависимости угла отклонения подвижной части электромеханических приборов от измеряемой величины. В тех случаях, когда аналитические зависимости довольно сложные, или зависимости были установлены экспериментально, применяют табличную форму представления функции преобразования. Фрагмент такого

Таблица 3.1

°C	R, Ом
0	100,00
10	103,90
20	107,79
30	111,67

представления для платиновых термометров сопротивления типа Pt-100 иллюстрирует табл. 3.1, в которой для некоторых дискретных точек представлена зависимость сопротивления термометра от температуры.

Следует различать *номинальную* функцию преобразования $y = f_n(x)$, которую записывают в нормативно-техническую документацию данного типа СИ и которая обобщенно характеризует весь ряд этого типа СИ, и *реальную* функцию преобразования – $y = f_p(x)$, присущую конкретному экземпляру данного типа средств измерений.

Отличие реальной функции преобразования от номинальной определяется допустимым разбросом характеристик и может быть обусловлено, в частности, технологией изготовления этих средств. Реальная функция преобразования конкретного СИ может быть определена только экспериментальным путем. Границы допускаемых отклонений номинальной характеристики в нормальных условиях должны включать все составляющие погрешности, возникающие при нормировании.

Например, номинальный коэффициент преобразования (усиления) $k_H = 500$ измерительного усилителя и допустимая относительная погрешность $\delta(k_H) = 2\%$ этого коэффициента означают, что реальный коэффициент усиления, не зависимо от причин отклонения от номинального, должен находиться в пределах $k = k_H \pm \delta(k_H)k_H/100 = 500 \pm 10$ для любого конкретного экземпляра усилителя данного типа в нормальных условиях эксплуатации.

Вид функции преобразования может быть различным в зависимости от принципа действия и способов реализации СИ. Однако крайне важно, чтобы функция была линейной. Кроме очевидного удобства в использовании, линейная функция позволяет существенно уменьшить инструментальную составляющую погрешности измерений и при конструировании СИ часто применяют различные способы линеаризации функции преобразования.

Функция преобразования достаточно полно характеризует СИ с точки зрения получения результатов измерений. В то же время во многих случаях для определения результатов измерений можно пользоваться относительно простыми характеристиками, которые по существу являются некоторыми численными параметрами функции преобразования.

Коэффициент преобразования – $k = y/x$; по тем же причинам бывают номинальный k_H и реальный k_p коэффициенты преобразования. В общем случае этот коэффициент имеет размерность [ед. изм. y /ед. изм. x]. Коэффициенты преобра-

зования могут иметь свои названия, например, для измерительного усилителя часто используют понятие коэффициент усиления. Для линейной функции преобразования $k_n = \text{const}$, для нелинейной – зависит от входного сигнала $k_p(x)$.

Чувствительность – свойство СИ, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины – $S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$.

Для *измерительных приборов* часто используют также понятие – *постоянная прибора* $C = 1/S$. Для линейной функции преобразования $S = 1/C = k$, что весьма удобно при эксплуатации измерительного прибора. Для нелинейной функции преобразования чувствительность $S(x)$ зависит от входного сигнала.

Для измерительных приборов важной МХ является *цена деления шкалы* C_d , равная разности двух значений величины, соответствующих двум соседним отметкам на шкале прибора. В случае равномерной шкалы C_d одинакова на всём ее протяжении.

Порог чувствительности $\Delta x_{\text{порог}}$ – характеристика СИ в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее измерение данным средством.

Диапазон измерений – область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности СИ.

Диапазон показаний – область значений шкалы прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы.

Разницу между диапазоном измерений и диапазоном показаний легко проиллюстрировать на примере электромагнитного амперметра. Такой прибор в силу принципа действия имеет нелинейную шкалу. Линейный участок шкалы в пределах ($\approx 15 \dots 100$)% всей шкалы. Данный диапазон является диапазоном измерений. В начальной части шкалы (до $\approx 15\%$) прибор в силу принципа действия реагирует на входной ток, но в этой части шкалы не обеспечена погрешность измерений, то есть амперметр «показывает, но не измеряет». В этом смысле весь диапазон шкалы ($0 \dots 100$)% является диапазоном показаний.

Пределы измерений – наибольшее и наименьшее значения диапазона измерений. Применяют понятия нижний предел и верхний пределы измерений.

4. НОРМИРОВАНИЕ ОСНОВНОЙ ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Нормирование основной погрешности мер

Для однозначных мер МХ являются их номинальные значения, а для многозначных мер – воспроизводимые значения. Для магазина мер задается диапазон воспроизводимой величины.

Для однозначных мер предел допускаемой основной погрешности представляют в форме относительной погрешности. Класс точности однозначной меры устанавливает *предел допускаемой основной относительной погрешности* δ (%) в виде числа k , удовлетворяющему выражению

$$\delta = 100\Delta x / x_0 = \pm k,$$

где x_0 – номинальное значение меры, Δx – предел допускаемой абсолютной погрешности меры.

Для однозначной меры оценить пределы допускаемой основной абсолютной погрешности можно по формуле

$$\Delta x = \pm kx_0/100,$$

где x_0 – номинальное значение меры.

Для многозначной меры (конденсатор переменной емкости, вариометр и т.п.) класс точности устанавливает *предел допускаемой приведенной погрешности*. Оценить пределы допускаемой относительной погрешности многозначной меры, выраженный в процентах от воспроизводимого значения величины x можно по формуле

$$\delta = \pm k x_{\max}/x, \quad \% \quad (4.1)$$

где k – класс точности; $x_{\max}$ – наибольшее значение меры; x – воспроизводимое мерой значение.

Для магазинов мер и многозначных мер класс точности указывается в виде двух чисел c/d . Тогда пределы допускаемой относительной основной погрешности (%) воспроизводимой величины определяется по формуле

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{x_{\max}}{x} - 1 \right) \right], \quad \% \quad (4.2)$$

где c/d – класс точности; $x_{\max}$ – верхний предел магазина; x – воспроизводимое значение.

Оценить пределы допускаемой абсолютной погрешности многозначной меры или магазина мер для воспроизводимого значения x можно для относительной погрешности δ , определенной по (4.1) или (4.2) по формуле:

$$\Delta x = \pm \delta x / 100,$$

Отметим, что приведенные формулы относятся к нормальным условиям применения мер. При отличии внешних условий от нормальных присутствует также дополнительная погрешность.

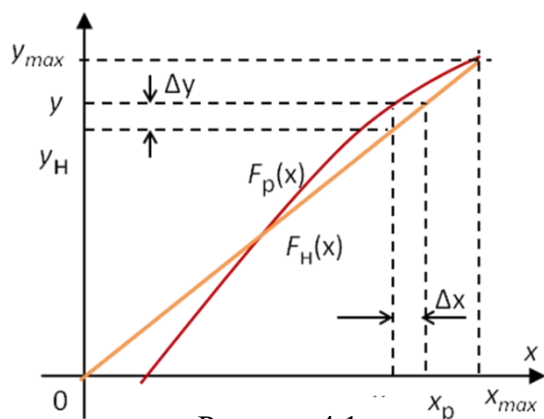


Рисунок 4.1

4.2. Нормирование основной погрешности измерительных преобразователей

Для измерительных преобразователей для получения результата измерения используется номинальная функция преобразования, отличная от реальной функции. На рис. 4.1 показаны линейная номинальная $y_n = F_n(x)$ и нелинейная реальная функции преобразования $y_p = F_p(x)$. Номинальный коэффициент преобразования $k_n = \text{const}$ зафиксирован в техническом описании преобразователя, а реальный $k_p(x)$ зависит от входного сигнала и, как правило, неизвестен.

Для измерительных преобразователей различают погрешности по выходу и по входу. Пусть на вход измерительного преобразователя подается сигнал, равный x . Ожидаемый сигнал на выходе преобразователя в соответствии с его номинальной характеристикой должен быть равным y_n . Однако в соответствии с реальной характеристикой $F_p(x)$ реальный выходной сигнал будет равен y .

Абсолютная погрешность Δy измерительного преобразователя по выходу равна

$$\Delta y = y - y_n = F_p(x) - F_n(x). \quad (4.3)$$

Погрешность измерительного преобразователя по входу – это отклонение приведенного ко входу сигнала измерительной информации от истинного (действительного) значения измеряемой величины, вызванное свойствами самого измерительного преобразователя. Результат измерения x определяется через обратную номинальную функцию преобразования и тогда абсолютная погрешность измерительного преобразователя по входу равна

$$\Delta x = F_n^{-1}(y) - x. \quad (4.4)$$

Погрешности по выходу (4.3) и входу (4.4) связаны соотношением

$$\Delta x = \Delta y / k_n. \quad (4.5)$$

Рассмотренные погрешности носят систематический характер, поскольку в отсутствие других факторов (помех, изменяющихся условий работы) они являются постоянными и повторяющимися для конкретных входных сигналов.

Другой причиной возникновения погрешностей является наличие внешних и внутренних помех, которые приводят к искажению выходных сигналов. Как правило, возникающие при этом погрешности, носят случайный характер.

Кроме того, существенное влияние на характеристики СИ могут оказывать внешние факторы, такие как температура, влажность, напряжение питания и многие другие. Эти факторы могут привести к дополнительным погрешностям.

При нормировании, как правило, указывают предел допускаемой абсолютной погрешности, которые определяются отклонением реальной функции преобразования от номинальной.

4.3. Нормирование основной погрешности приборов

При проведении измерения с помощью конкретного прибора получают определенный результат измерения, например, в виде его показаний α . При определении основной погрешности исходят из двух условий:

1. Статический режим измерения, при котором измеряемая величина не меняется во времени;
2. Нормальные условия эксплуатации, при которых значения влияющих факторов равны номинальным значениям.

В этом случае основная погрешность прибора не зависит от характера изменения измеряемой величины и от изменения внешних влияющих факторов и является характеристикой прибора.

Для представления результата измерения необходимо оценить основную абсолютную погрешность измерения

$$\Delta x = x - x_0, \quad (4.6)$$

где x – результат измерения, x_0 – действительное значение измеряемой физической величины.

Для оценки погрешности результатов измерения используются определенная метрологическая характеристика СИ – его класс точности [1].

Класс точности СИ – обобщенная характеристика данного типа СИ отражающая уровень их точности, выражаемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Пределы допускаемой погрешности понимаются как границы интервала, в котором находятся значения погрешности.

Предел допускаемой погрешности СИ – наибольшее значение погрешности СИ, устанавливаемое нормативным документом для данного типа СИ, при котором оно еще признается годным к применению. Предел допускаемой основной погрешности представляют в форме абсолютной, относительной и приведенной погрешностей.

Рассмотрим способы нормирования основной погрешности путем задания класса точности для важнейшего класса средств измерений – электроизмерительных приборов. Возможны три способа задания класса точности в зависимости от характера изменения основной погрешности по диапазону измерения.

Для приборов аддитивным характером изменения абсолютной погрешности класс точности устанавливает *пределы допускаемой приведенной основной погрешности* γ (%) в виде числа p , удовлетворяющего выражению

$$\gamma = 100 \Delta x / x_N = \pm p, \quad (4.7)$$

где $\pm \Delta x$ – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности; x_N – нормирующее значение.

Класс точности прибора обозначают числом p , выбираемым из ряда

$$(1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0)10^n, \quad (4.8)$$

где $n = 1; 0; -1; -2 \dots$

Нормирующее значение x_N в (4.7) в зависимости от предела измерения прибора равно:

- 1) большему из пределов измерений, если нулевая отметка расположена на краю или вне диапазона измерения;
- 2) сумме модулей пределов измерения, если нулевая отметка расположена внутри диапазона измерения;
- 3) длине шкалы или её части, соответствующей диапазону измерения, если шкала существенно неравномерна, например, у омметра;
- 4) номинальному значению измеряемой величины, если таковое установлено (например, у частотомера с номинальным значением 50 Гц);
- 5) модулю разности пределов измерений, если принята шкала с условным нулём (например, для температуры), и т.д.

Для приборов с мультипликативным характером изменения основной абсолютной погрешности

$$\Delta x = bx, \quad ,$$

класс точности устанавливает пределы *допускаемой основной относительной погрешности* δ (%) в виде числа q , удовлетворяющему выражению

$$\delta = 100\Delta x / x = \pm q, \quad (4.9)$$

где x – значение измеряемой величины в диапазоне измерений.

Класс точности в этом случае обозначается как число q , выбираемое из ряда (4.8) и помещенного в кружок.

Для приборов с аддитивно-мультипликативным характером изменения основной абсолютной погрешности ее пределы задаются в виде суммы аддитивной Δx_a и мультипликативной Δx_m составляющих

$$\Delta x = \pm (\Delta x_a + \Delta x_m) = \pm (a + bx), \quad (4.10)$$

где a, b – некоторые положительные числа; x – значение измеряемой величины.

Класс точности обозначается в виде двух чисел c/d , входящих в соотношение (4.11), которое является оценкой пределов *допускаемой основной относительной погрешности* δ (%)

$$\delta = \pm [c + d(|\frac{x_k}{x}| - 1)], \quad (4.11)$$

где x_k – больший (по модулю) из пределов измерений прибора; $c = (b + d)$ – приведенная погрешность (%); $d = \frac{a}{|x_k|} 100$ – приведенная аддитивная погрешность (%); значения c/d в обозначении класса точности также выбираются из ряда (4.8), причем $c > d$.

Значение c в (4.11) равно пределу допускаемой основной приведенной погрешности в конце шкалы, а значение d – пределу допускаемой основной аддитивной приведенной погрешности в начале диапазона при $x = 0$.

Обозначение классов точности указываются в нормативно-технической документации, а также на передних панелях (шкалах) средств измерений. Принятые условные обозначения для классов точности приведены в табл. 2.

Зная класс точности прибора можно из формул, приведенных в табл. 4.1, оценить границы основной абсолютной погрешности $\pm \Delta x$ для конкретного результата измерения. Из (4.2) следует, что действительное значение измеряемой физической величины x_0 находится в интервале

$$x_0 = x \pm \Delta x, \quad (4.12)$$

где x – показание прибора; $\pm \Delta x$ – границы допускаемой основной абсолютной погрешности результата измерения, оцениваемые по классу точности.

Таблица 4.1

Формулы для оценки предела допускаемой основной погрешности СИ: γ - приведенной (%); δ - относительной (%).	Формулы для оценки предела 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
$\delta = \frac{\Delta x}{x} 100 = \pm q \%$	$\Delta x = \pm \frac{q x}{100}$	1,0
$\delta = \pm [c + d (\frac{x_N}{x} - 1)] \%$	$\Delta x = \pm \frac{\delta x}{100}$	0,05/0,02

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ К ВЛИЯЮЩИМ ВЕЛИЧИНАМ

В общем случае на СИ кроме входного воздействия x могут оказывать влияние множество других факторов ξ_i , таких как температура, влажность, магнитные поля и т. п. (см. рис. 5.1). При нормировании чувствительности СИ к влияющим величинам задают:

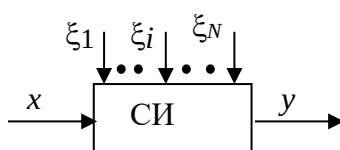


Рисунок 5.1

1. Рабочие условия эксплуатации $\xi_{1р}.. \xi_{ip} .. \xi_{np}$;
2. Нормальные условия эксплуатации $\xi_{1н}.. \xi_{in} .. \xi_{nn}$.

При рабочих условиях эксплуатации МХ СИ нормированы и его можно применять. При нормальных условиях применения присутствует только основная погрешность.

При отличии значения i -ого влияющего фактора от нормального значения ξ_{in} выходной сигнал СИ y изменяется, что трактуется как возникновение дополнительной погрешности $\Delta y_{доп}$. Для ее оценки представим выходной сигнал СИ в виде функции нескольких переменных

$$y = F(x, \xi_1.. \xi_i .. \xi_N).$$

Для независимых факторов, взяв полный дифференциал от этой функции и перейдя к конечным приращениям, можно получить следующее выражение

$$\Delta y = \frac{dF(\cdot)}{dx} \Delta x + \frac{dF(\cdot)}{d\xi_1} \Delta \xi_1 + ... + \frac{dF(\cdot)}{d\xi_i} \Delta \xi_i + ... + \frac{dF(\cdot)}{d\xi_N} \Delta \xi_N \quad (5.1)$$

где для упрощения записи функция $F(x, \xi_1.. \xi_i .. \xi_N)$ представлена как $F(\cdot)$;

$\Delta \xi_i = (\xi_i - \xi_{in})$ – отличие i -ого фактора от номинального значения; $\frac{dF(\cdot)}{d\xi_i} \Delta \xi_i$ – функция влияния i -ого фактора.

В (5.1) первое слагаемое определяет составляющую изменения выходного сигнала от изменения измеряемой величины, т. е. отражает основной принцип работы СИ. Каждое последующее слагаемое определяет свой «вклад» в изменение выходного сигнала от конкретных влияющих факторов ξ_i и их называют *функциями влияния*. Обычно принимают, что частные производные в (5.1) являются постоянными величинами и их называют *коэффициентами влияния* $k_{вл}$ и тогда можно оценить границы абсолютной дополнительной погрешности от изменения i -ого фактора в виде:

$$\Delta y_{доп}(\xi_i) = \pm \frac{\partial F(\cdot)}{\partial \xi_i} \Delta \xi_i = \pm k_{вл i} (\xi_i - \xi_{ин}) \quad (5.2)$$

Оценка суммарной дополнительной погрешности. Для *оценки предельной суммарной абсолютной погрешности* от влияния всех факторов можно использовать соотношение:

$$\Delta y_{доп} = \pm \sum_i k_{вл i} (\xi_i - \xi_{ин}) \quad (5.3)$$

Более удобно при оценке суммарной погрешности по формуле (5.3) использовать *приведенную дополнительную погрешность* от влияния i -ого фактора (y_N – нормирующее значение шкалы СИ)

$$\gamma_{i доп} = \frac{\Delta y_{i доп}(\xi_i)}{y_N} 100\%. \quad (5.4)$$

Введем в рассмотрение функцию влияния в новой трактовке

$$\psi(\xi_i) = \frac{\gamma_{i доп}(\xi_i)}{\Delta \xi_i}. \quad (5.5)$$

В этом случае предельную дополнительную погрешность от влияния i -ого фактора при известном отклонении значения влияющего фактора от нормального значения $\Delta \xi_i = (\xi_i - \xi_{ин})$ можно оценить по формуле

$$\gamma_{i доп} = \pm \psi(\xi_i) \Delta \xi_i \quad (5.6)$$

Например, при оценке влияния температуры T на некоторое средство, функцию влияния задана в виде $\Psi(T) = 1\% / 10^\circ \text{C}$. Тогда при изменении температуры на 15°C границы дополнительной приведенной погрешности составит $\pm 1,5\%$.

Для оценки предельной приведенной суммарной дополнительной погрешности достаточно оценить дополнительные погрешности по формуле (5.6) от каждого влияющего фактора, а затем найти предельную суммарную дополнительную погрешность:

$$\Delta \gamma_{доп} = \pm \sum_i \gamma_{i доп}.$$

6. ХАРАКТЕРИСТИКИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ НА ИЗМЕРЯЕМУЮ ВЕЛИЧИНУ

В процессе измерений в той или иной форме происходит взаимодействие СИ с измеряемой величиной, что может привести к увеличению погрешности измерений (см. рис. 6.1).

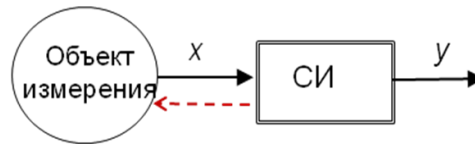


Рисунок 6.1

Характеристик, определяющих влияние СИ на измеряемую величину, в общем случае может быть много. Для электрических измерений наиболее типичными являются следующие характеристики: *входное сопротивление* $R_{ВХ}$ и *входная емкость* $C_{ВХ}$; выделяемые (или потребляемые) на объекте измерений мощность, ток, или напряжение.

Для примера рассмотрим влияние входного сопротивления вольтметра и амперметра на измеряемую величину (см.рис.6.2, а).

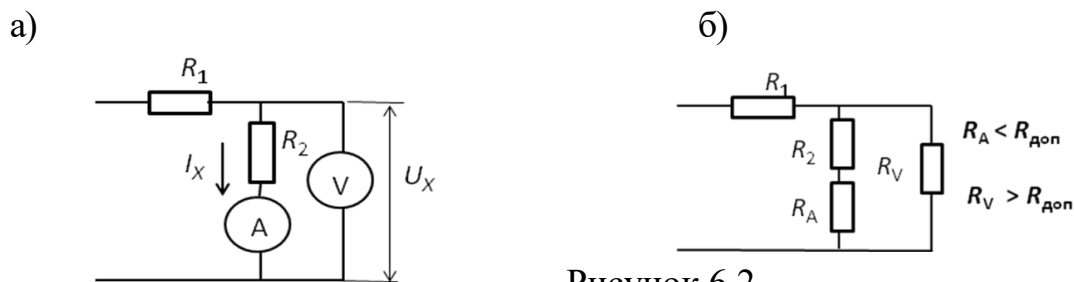


Рисунок 6.2

Так, включение вольтметра параллельно некоторому участку цепи, на котором измеряется напряжение, изменяет сопротивление этого участка из-за конечного входного сопротивления вольтметра и тем самым искажает результат измерений. Включение амперметра всегда приводит к увеличению сопротивления цепи, в которой измеряется ток. Эквивалентная схема участка цепи с учетом внутренних сопротивлений амперметра R_A и вольтметра R_V показана на рис. 6.2, б.

Для исключения влияния внутренних сопротивлений приборов необходимы невыполнимые условия, а именно: сопротивления амперметра равно 0, а сопротивление вольтметра – бесконечности.

На практике внутренние сопротивления нормируют следующим образом: задают максимальное допустимое значение сопротивления для данного типа амперметров и $R_A < R_{доп}$ минимальное допустимое значение сопротивления для данного типа вольтметров $R_V > R_{доп}$. Значения этих допустимых сопротивлений указываются в нормативно-технической документации на приборы.

На переменном токе наиболее часто используемая эквивалентная схема входной цепи средств электрических измерений представлена на рис. 6.3, где $R_{ВХ}$ – эквивалентное сопротивление входной цепи СИ относительно входных зажимов,

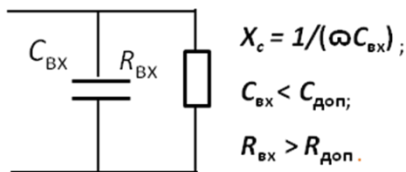


Рисунок 6.3

а $C_{ВХ}$ – эквивалентная емкость входной цепи, определяемая распределенными емкостями монтажа входных цепей, конструкцией входных зажимов (кабелей).

Входная емкость оказывает шунтирующее влияние при повышенных частотах, что приводит к увеличению погрешности. Для переменного тока при нормировании задают *минимально допустимое* значение $R_{ВХ}$ и *максимально допустимое* значение $C_{ВХ}$. В табл. 6.1 для примера приведены характеристики электронного вольтметра типа ВЗ-38.

Таблица 6.1

Диапазон измерения напряжений	1-3-10-30-100-300 мВ, 1-3-10-30-100-300 В
Диапазон частот	20 Гц ... 5 МГц
Класс точности	2,5 ... 6
Входная емкость	30 пФ (1-300мВ) и 15 пФ (1-300 В)
Входное сопротивление	5 МОм (1-300мВ) и 4 МОм (1-300 В)

7. НОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

7.1. Динамический режим работы средств измерений

Изменение входного сигнала СИ во времени может оказывать значительное влияние на результаты измерений. Измерение изменяющихся во времени величин называется динамическим режимом (см. рис. 7.1). Динамический режим является основным при применении СИ в различных системах контроля и управления различными физическими объектами и технологическими процессами. При динамическом режиме существенными являются характер изменения сигнала $x(t)$, т.е. его динамические характеристики, и «скорость реакции» СИ на входное воздействие, определяемая динамическими свойствами этого СИ.



Рисунок 7.1

Рассмотрим динамический режим для аналоговых СИ и сформулируем общий подход к оценке динамической погрешности. Для того чтобы выходной сигнал $y_n(t)$ некоторого идеального в динамическом смысле СИ

точно отображал во времени измеряемую величину $x(t)$ независимо от характера ее изменения, необходимо соблюдение соотношения

$$y_n(t) = k_n x(t), \quad (7.1)$$

где k_n – номинальный коэффициент преобразования.

«Идеальность» этого соотношения в том, что измеряемая величина легко находится по выходному сигналу (основная процедура при измерениях)

$$x(t) = y_n(t)/k_n; \quad (7.2)$$

при этом отсутствует какая-либо погрешность определения $x(t)$, обусловленная изменением входной величины во времени. Уравнение (7.1) соответствует идеальному безынерционному линейному преобразованию. Реальные СИ в той или иной степени обладают инерционными свойствами из-за наличия элементов, запасаящих энергию. Например, подвижных элементов, обладающих определенной массой, и упругих элементов в электромеханических приборах, емкостей и индуктивностей в электрических цепях и т. п. Это приводит к более сложной зависимости между $x(t)$ и выходным сигналом $y(t)$ реального СИ.

Для выделения свойств динамического режима примем, что средство измерений не имеет статической погрешности, т. е. реальный коэффициент преобразования $k_p = k_n$ во всем диапазоне изменения $x(t)$.

Динамический режим широкого класса средств измерений может быть описан линейным неоднородным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами

$$A_n y^{(n)}(t) + A_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \dots + A_j y^{(j)}(t) + \dots + A_1 y'(t) + y(t) = k_n x(t). \quad (7.3)$$

Это уравнение отличается от уравнения (7.1) наличием членов, содержащих производные от выходного сигнала $y(t)$ и некоторые постоянные коэффициенты A_j , которые определяют динамические свойства средств измерений. При равенстве нулю этих членов уравнение (7.3) вырождается в уравнение (7.1). Решение $y(t)$ дифференциального уравнения (7.3) описывает выходной сигнал средства измерения при входном воздействии $x(t)$. Общее решение $y(t)$ неоднородного линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами определяется суммой:

$$y(t) = y_c(t) + y_v(t),$$

где $y_c(t)$ – общее решение соответствующего однородного дифференциального уравнения, описывающее свободные колебания СИ; $y_v(t)$ – частное решение уравнения (7.3), описывающее вынужденные колебания. Для устойчивых средств измерений свободные колебания являются затухающими, т. е. $\lim_{t \rightarrow \infty} y_c(t) = 0$.

В этом плане различают *переходный динамический режим*, определяемый $y_c(t)$ и $y_v(t)$ и *установившейся динамический режим* СИ, определяемый $y_v(t)$.

На рис. 7.2, а показаны выходные сигналы $y(t)$ некоторого реального и

$y_{\text{и}}(t)$ идеального (безынерционного) средств измерений при входном сигнале $x(t) = \sin \omega t, t > 0$. На рис. 7.2, б представлена схема формирования погрешности в динамическом режиме.

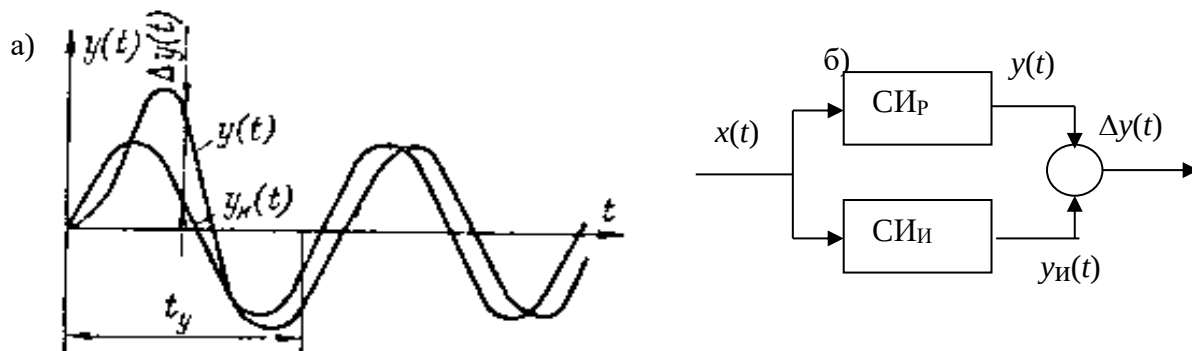


Рисунок. 7.2

Погрешность $\Delta y(t)$ в динамическом режиме по выходу СИ есть разность между выходным сигналом $y(t)$ реального средства и сигналом $y_{\text{и}}(t)$ идеального в динамическом смысле СИ (при этом предполагается, что СИ однородны: реальный осциллограф и идеальный осциллограф, реальный вольтметр и идеальный вольтметр и т. п.)

$$\Delta y(t) = y(t) - y_{\text{и}}(t). \quad (7.4)$$

В общем случае погрешность в динамическом режиме представляет собой сумму динамической и статической погрешностей. Поскольку статическая погрешность при данном рассмотрении принята равной нулю, то выражение (7.3) определяет только динамическую погрешность.

Вычитая из (7.3) уравнение (7.1) и учитывая (7.4), получим выражение для динамической погрешности по выходу для реального СИ:

$$\Delta y(t) = -A_n y^{(n)}(t) - A_{n-1} y^{(n-1)}(t) - \dots - A_j y^{(j)}(t) - \dots - A_1 y'(t). \quad (7.5)$$

Из (7.5) следует, что *динамическая погрешность зависит от динамических свойств средств измерений*, определяемых коэффициентами A_j , и от входных сигналов $x(t)$, поскольку от этих сигналов зависит решение $y(t)$ дифференциального уравнения (7.3), т.е. выходной сигнал и, естественно, его соответствующие производные.

Выражение (7.5) для динамической погрешности носит в большей степени познавательный характер, выявляющий основные факторы, влияющие на погрешность, чем конструктивный, т. е. позволяющий количественно определить саму динамическую погрешность. Дело в том, что определение производных выходного сигнала, если оно вообще возможно, как например, в регистрирующих приборах, осуществляется, как правило, с низкой точностью и, следовательно, достоверность

оценки динамической погрешности по (7.5) оказывается довольно низкой.

Динамические погрешности являются функцией времени. Точное определение динамической погрешности является весьма сложной задачей и далеко не всегда имеющей аналитическое решение. Поэтому на практике пользуются некоторыми оценками динамической погрешности или выбирают такие СИ и с такими динамическими характеристиками, при которых динамические погрешности становятся допустимо малыми при известных ограничениях на динамику изменения входных сигналов.

Для оценки динамического режима средств измерений во всех случаях необходимо знать динамические характеристики средств измерений.

7.2. Динамические характеристики средств измерений и оценка динамической погрешности

Для анализа динамического режима средств измерений (СИ) применяют:

- полные динамические характеристики, полностью описывающие принятую математическую модель динамических свойств СИ;
- частные динамические характеристики – это некоторые показатели динамических свойств СИ, являющиеся по существу параметрами полных динамических характеристик.

Порядок уравнения (7.3) определяется динамическими свойствами СИ и в общем случае может быть высоким. Дифференциальные уравнения высокого порядка могут быть представлены системой дифференциальных уравнений более низкого порядка. По существу, это означает представление сложного в динамическом смысле СИ более простыми динамическими звеньями. Для исследования динамических свойств СИ широкое распространение получили динамические звенья первого и второго порядков. Рассмотрим динамические характеристики звена 2-го порядка, как наиболее распространенного для средств измерений.

Полные динамические характеристики. Такими характеристиками являются: дифференциальные уравнения, переходные и импульсные переходные характеристики, частотные характеристики, передаточные функции.

Дифференциальные уравнения. Применение дифференциальных уравнений для описания динамического режима СИ представлено выше. Здесь отметим следующее.

Динамический режим звена 2-го порядка математически описывается следующим дифференциальным уравнением

$$A_2 y''(t) + A_1 y'(t) + y(t) = k_H x(t). \quad (7.6)$$

Для более удобной интерпретации постоянные коэффициенты в (6) могут быть представлены в другом виде

$$\frac{1}{\omega_0^2} y''(t) + \frac{2\beta}{\omega_0} y'(t) + y(t) = k_H x(t), \quad (7.7)$$

где ω_0 – частота собственных колебаний; β – коэффициент демпфирования (или степень успокоения), от которых в достаточно явной форме зависит характер переходного и установившегося динамического режима.

Для идеального звена дифференциальное уравнение (7) вырождается в алгебраическое уравнение (7.1).

Переходные и импульсные переходные характеристики. Переходная характеристика $h(t)$ есть реакция СИ на входное воздействие $x(t)$, представляющее собой единичный скачок $1(t)$. Импульсная переходная характеристика $g(t)$ есть реакция СИ на входное воздействие в виде дельта-функции $\delta(t)$. Поскольку $\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt}$, то $g(t) = \frac{dh(t)}{dt}$.

Для звена 2-го порядка вид переходной характеристики существенно зависит от коэффициента демпфирования β . Существуют три режима переходной характеристики:

колебательный режим ($\beta < 1$)

$$h(t) = k_H \left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin(\sqrt{1-\beta^2} \omega_0 t + \arccos \beta) \right],$$

критический режим ($\beta = 1$)

$$h(t) = k_H [1 - (1 + \omega_0 t) e^{-\omega_0 t}],$$

апериодический (переуспокоенный) режим ($\beta > 1$)

$$h(t) = k_H \left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \sin(\sqrt{\beta^2 - 1} \omega_0 t + \operatorname{arch} \beta) \right].$$

На рис. 7.3 показаны переходные характеристики звена 2-го порядка в координатах приведенной ко входу переходной характеристики $h(t)/k_H$ и безразмерного времени $\omega_0 t = 2\pi t/T_0$, где T_0 – период свободных колебаний динамического звена.

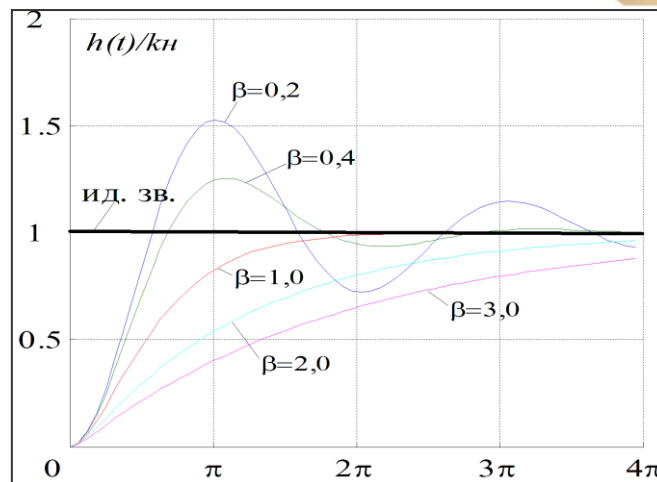


Рисунок 7.3

Критический режим ($\beta = 1$) является граничным между колебательным ($\beta < 1$) и апериодическим ($\beta > 1$); он характерен тем, что переходный процесс в таком режиме наиболее быстро и апериодически стремится к установившемуся значению. В этом смысле критический режим является оптимальным для многих приложений.

Переходная характеристика идеального звена показана на рисунке жирной линией; из (7.1) очевидно, что $h_{\text{ид}}(t)/k_H = 1(t)$. Для идеального (безинерционного) звена отсутствует какое-либо запаздывание реакции измерительного средства на входное воздействие.

Частные динамические характеристики. Эти характеристики применяют для анализа установившегося динамического режима. Такие характеристики позволяют в компактной и упрощенной форме оценивать динамические характеристики средств измерений.

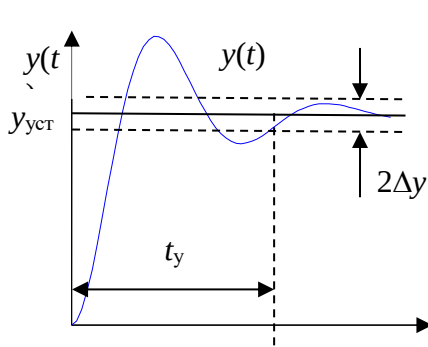


Рисунок 7.4

Прозрачный физический смысл и удобство использования обусловили широкое применение на практике частных динамических характеристик. Существует большое количество частных динамических характеристик, применяемых к различным типам средств измерений. Рассмотрим некоторые из них, часто используемые для указания динамических свойств СИ.

Время установления t_y (или время реакции) – промежуток времени от момента подачи на средство измерений входного сигнала в виде единичного скачка до момента времени, когда выходной сигнал не будет отклоняться от установившегося значения на заранее заданную величину Δ (см. рис. 7.4). Например, для электромеханических приборов типичное значение $t_y = 3$ сек.

Рабочая полоса частот СИ – диапазон частот входных сигналов, при котором амплитудно-частотная характеристика СИ не отклоняется от номинального значения k_H (определенного на некоторой частоте) на заранее установленную величину Δk_H . Рабочую полосу частот задают значениями (в Гц.) верхней f_B и нижней f_H частот указанного диапазона. В частности, при $f_H = 0$ средство измерений пропускает постоянную составляющую входного сигнала.

Максимальная скорость нарастания фронта импульсов и первый максимальный выброс – параметры переходной характеристики, определяющие возможные искажения сигнала при его скачкообразном изменении (см. рис. 7.5).

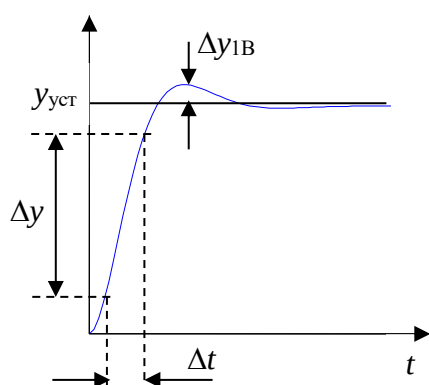


Рисунок 7.5

Скорость нарастания фронта V_F определяется отношением изменения Δy выходного сигнала ко времени Δt этого изменения, $V_F = \Delta y / \Delta t$ (в частности, размерность такой скорости [В/сек]). Первый максимальный выброс обычно представляют отношением первого выброса $\Delta y_{1в}$ переходной характеристики к установившемуся значению $y_{уст}$ выходного сигнала, $\beta_{1\text{выбр}} = (\Delta y_{1в} / y_{уст}) \%$.

Принципиально выброса может и не быть (см. рис. 7.3) при $\beta \geq 0,707$. Однако при этом уменьшается скорость нарастания фронта. Проектировщик СИ выбирает разумный компромисс между этими параметрами.

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. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. <http://www.fundmetrology.ru>.