

### 3. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Цели составления метрологических структурных схем измерительных каналов:

анализ причин возникновения погрешности результата измерений

получение расчетных формул для оценки характеристик погрешности результатов измерений.

В данной главе рассмотрены метрологические структурные схемы измерений, выполняемых измерительными каналами измерительных информационных систем в статическом и динамическом режимах. В этих схемах одним элементом обозначены все последовательные аналоговые преобразования сигналов измерительной информации. Также одним элементом представлены цифровые преобразования сигнала измерительной информации к единицам измеряемой величины. В число таких преобразований (чаще всего это математическая обработка данных в компьютере) может входить фильтрация сигнала или линеаризация характеристики датчика. Только после проведения таких процедур выходной сигнал можно сопоставить с принятой шкалой измеряемой величины.

В дальнейшем будут рассмотрены два режима измерений: статический режим и динамический.

*Статический режим измерений* – режим измерений, при котором погрешности, вызванные изменением во времени измеряемой величины и

инерционностью средств измерений, пренебрежимо малы по сравнению с погрешностями измерения той же величины при условии ее неизменности.

*Динамический режим измерений* – режим измерений, при котором погрешности, вызванные изменением во времени измеряемой величины, существенны по сравнению с погрешностями измерения той же величины при условии ее неизменности.

### 3.1. Статический режим измерений, прямые измерения

#### 3.1.1. Общая метрологическая структурная схема

На рис. 8. приведена метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме для общего случая применения нелинейных средств измерений.

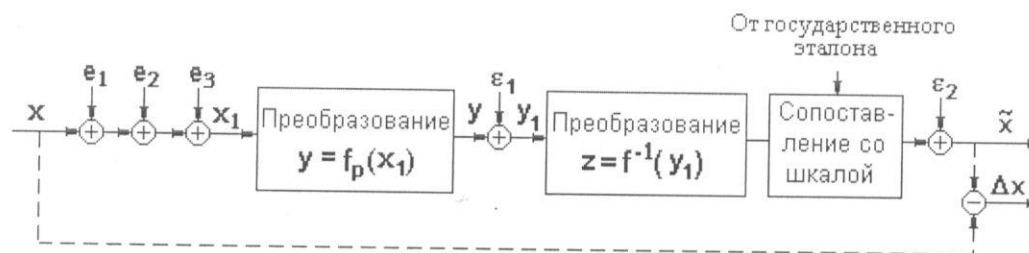


Рис. 8. Метрологическая структурная схема прямых измерений в статическом режиме

Данная схема пригодна для анализа измерений, выполняемых как аналоговыми, так и цифровыми средствами измерений в статическом режиме, в том числе, отдельными измерительными каналами ИИС,

На рис. 8 обозначено:

$x$  – истинное значение измеряемой величины,

$e_1$  – погрешность, вызванная несоответствием принятой математической модели объекта и измеряемой величины их фактическим моделям (см. также раздел 2.1),

$e_2$  – погрешность, вызванная взаимодействием средства измерений с объектом (см. раздел 2.2),

$e_3$  – погрешность, вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами,

$y = f_p(x)$  – реальная фактическая функция преобразования конкретного экземпляра средства измерения,

$y = f(x)$  – номинальная функция преобразования, декларированная для средств измерений данного типа,

$x = f^{-1}(y)$  – функция, обратная функции  $y = f(x)$ ,

$\varepsilon_1$  – собственная погрешность преобразования средства измерения, вызванная дрейфом выходного сигнала преобразователя, собственными тепловыми шумами и помехами,

$\varepsilon_2$  – погрешность, состоящая из погрешности реализации обратной функции  $x = f^{-1}(y)$ , погрешности воспроизведения шкалы и погрешности сопоставления со шкалой, в том числе это погрешности округления, выполняемого оператором при отсчете показаний аналогового прибора или вызванного конечной разрядностью цифрового прибора или аналого-цифрового преобразователя,

$\tilde{x}$  – результат прямого измерения величины  $x$ ,

$\Delta x$  – погрешность результата измерения,  $\Delta x = \tilde{x} - x$ .

Различие между функциями  $y = f_p(x)$  и  $y = f(x)$  вызвано неточностью воспроизведения функции  $y = f_p(x)$  из-за погрешностей изгото-

товления и старения комплектующих изделий, из-за воздействия внешних влияющих факторов, а также из-за разброса на множестве экземпляров средств измерений. Разность между этими функциями обозначим  $\Delta f(x) = f_p(x) - f(x)$ . Такая разность случайна на множестве экземпляров средств измерений одного типа, и в целях обеспечения надлежащего метрологического качества должна быть ограничена пределами допускаемых

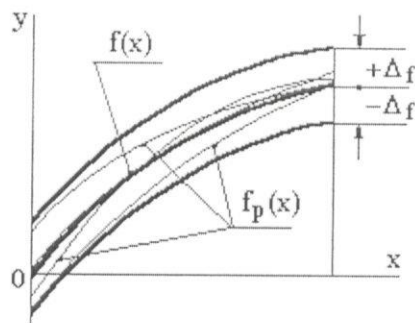


Рис. 9. Пример области допустимого разброса функций преобразования средств измерений одного типа

различий  $(-\Delta_f, +\Delta_f)$  между этими функциями для всех значений измеряемой величины из диапазона измерения:

$$|f_p(x) - f(x)| \leq \Delta_f. \quad (2)$$

Неравенство (2) ограничивает область, в которой должны находиться функции преобразования всех средств измерений, признаваемых пригодными к применению. Пример такой области представлен на рис. 9.

Значение  $\Delta_f$  должно быть указано в технической документации на средство измерений.

Естественными требованиями, предъявляемыми к функциям преобразования средств измерений, являются требования монотонности (а следовательно, взаимной однозначности преобразования) и гладкости, то есть ограниченности модуля производных. Однако, производная функции преобразования – это *чувствительность* средства измерений:

$$S = df_p(x)/dx \cong df(x)/dx.$$

Близость производных функций  $y = f_p(x)$  и  $y = f(x)$  можно выразить неравенством

$$\left| \frac{f'_p(x)}{f'(x)} - 1 \right| \leq \delta$$

где  $\delta > 0$  и имеет один порядок величины с собственной относительной погрешностью средства измерений.

Для удобства дальнейших рассуждений обозначим

$$e = e_1 + e_2 + e_3.$$

Тогда, используя схему, представленную на рис. 8, запишем выражение для абсолютной погрешности результата прямого измерения, выполняемого подобным средством:

$$\Delta x = f^{-1}(f_p(x + e) + \varepsilon_1) + \varepsilon_2 - x$$

и перегруппируем слагаемые:

$$f^{-1}(f_p(x + e) + \varepsilon_1) = \Delta x + x - \varepsilon_2. \quad (3)$$

В силу монотонности функции  $f(x)$  выражение (3) равносильно следующему:

$$f_p(x + e) + \varepsilon_1 = f(x + \Delta x - \varepsilon_2),$$



Применим разложение функций в степенной ряд относительно точки  $x$  и, воспользовавшись малостью погрешностей, оставим только первые и линейные члены этих рядов. Тогда после перегруппировки слагаемых получим:

$$f'(x)\Delta x = f_p(x) - f(x) + f'_p(x)e + f'(x)\varepsilon_2 + \varepsilon_1. \quad (4)$$

Производная  $f'(x)$  номинальной функции, то есть чувствительность средства измерений, не должна быть равна нулю, поэтому можно разделить обе части равенства (4) на  $f'(x)$ :

$$\Delta x = \frac{\Delta f(x)}{f'(x)} + \varepsilon + e, \quad (5)$$

где  $\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2$  - собственная абсолютная аддитивная погрешность средства измерений.

Первое и второе слагаемые, находящиеся в правой части равенства (5), порождены собственными свойствами средства измерений, поэтому сумма

$$\Delta_{\text{инст}}x = \frac{\Delta f(x)}{f'(x)} + \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon_2 \quad (6)$$

называется *инструментальной составляющей абсолютной погрешности* или *инструментальной погрешностью*. При выпуске средства измерений из производства, при его транспортировании, хранении и эксплуатации инструментальная погрешность не должна превышать (может быть, с некоторой вероятностью) некоторого заранее установленного значения, то есть нормы  $\Delta_x$ . Значение нормы  $\Delta_x$  погрешности  $\Delta_{\text{инст}}x$ , устанавливается при проектировании средства измерений и сообщается пользователю в сопроводительной технической документации. Процесс установления нормы на инструментальную погрешность называется *нормированием характеристики инструментальной погрешности средства измерений*. Норма погрешности  $\Delta_x$  в соответствии с определением, приведенным в разд. 2.1, является метрологической характеристикой средства измерений. Ответственность за инструментальную погрешность несет разработчик и производитель средства измерений.

Слагаемое  $e$  в правой части равенства (5) порождено причинами, возникающими при применении средства измерений, а именно взаимодействием с объектом, неадекватностью принятых математических моделей измеряемой величины и объекта, пульсациями и помехами, источником которых является объект. Это слагаемое составляет *различие между погрешностями средства измерений и погрешностями результата измерений*, и за него несут ответственность пользователи средства измерений. Поэтому далее погрешность  $e = e_1 + e_2 + e_3$  будем называть *погрешностью применения* средства измерений. Оценку характеристики погрешности применения для конкретных условий выполняет пользователь средства измерений. Нормы на эту погрешность, как правило, не устанавливаются.

Как отмечено ранее, значение погрешности результата каждого измерения не может быть определено, поэтому на практике используют оценки интервальных характеристик погрешности. Исходными данными для расчета характеристики абсолютной погрешности результата измерений в виде границ интервала неопределенности  $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$  могут быть только предельно допускаемые значения  $\Delta_f$  и  $\Delta_e$  составляющих абсолютной инструментальной погрешности, которые должны быть сообщены пользователю в технической документации на средство измерений. Гарантии в отношении сохранности этих характеристик обеспечивает изготовитель средства измерений и контролирующие метрологические органы. Предельно возможные границы  $(-\Delta_e, +\Delta_e)$  погрешности  $e$  определяются пользователем в соответствии с конкретными условиями измерений.

Итак, если исходные данные известны, то есть, если известно (может быть, с некоторой вероятностью), что

$$|f_p(x) - f(x)| \leq \Delta_f, \quad |\varepsilon| = \left| \frac{\varepsilon_1}{f'(x)} + \varepsilon \right| \leq \Delta_\varepsilon, \quad |e| \leq \Delta_e,$$

то на основании равенства (6) об абсолютной погрешности результата измерений можно заключить, что ее значения не должны выходить за пределы, которые определяются неравенством

$$|\Delta x| \leq \frac{\Delta_f}{f'(\tilde{x})} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon. \quad (7)$$

Таким образом границы интервала остаточной неопределенности значения измеряемой величины суть  $(\tilde{x} - \Delta_x, \tilde{x} + \Delta_x)$ , где

$$\Delta_x = \frac{\Delta_f}{f'(\tilde{x})} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon,$$

$\tilde{x}$  – результат измерения.

Абсолютная инструментальная погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой величины, лежит (может быть, с некоторой вероятностью) в пределах  $(-\Delta_{\text{инст}}, +\Delta_{\text{инст}})$ , где

$$\Delta_{\text{инст}} = \frac{\Delta_f}{f'(\tilde{x})} + \Delta_\varepsilon. \quad (8)$$

В рассмотренном общем случае удобно устанавливать норму  $\gamma_{\text{отн}}$  на относительную инструментальную погрешность средства измерений или норму  $\gamma_{\text{прив}}$  на приведенную инструментальную погрешность, отнесенную к наибольшему значению измеряемой величины в диапазоне измерения. Такие нормы выражаются в процентах:

$$\left| \frac{\Delta_{\text{инст}} x}{\tilde{x}} \right| 100\% \leq \frac{\Delta_{\text{инст}}}{\tilde{x}} 100\% = \frac{\Delta_f}{\tilde{x} \cdot f'(\tilde{x})} 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{\tilde{x}} 100\% = \gamma_{\text{отн}},$$

$$\left| \frac{\Delta_{\text{инст}} x}{x_{\text{max}}} \right| 100\% \leq \frac{\Delta_{\text{инст}}}{x_{\text{max}}} 100\% = \frac{\Delta_f}{x_{\text{max}} \cdot f'(x)} 100\% + \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{\text{max}}} 100\% = \gamma_{\text{прив}}.$$

### 3.1.2. Примеры погрешности применения средства измерений

**Пример 1.** Погрешность  $e_1$ , вызванная несоответствием принятой математической модели объекта и измеряемой величины их фактическим моделям.

*Объект измерения – стержень с неровными краями.* При постановке задачи измерения длины такого стержня рассматриваемая погрешность определяется неровностью его краев вне зависимости от точности применяемого средства измерений. Варианты корректной постановки задачи измерения:

измерить среднюю длину стержня,

измерить минимальную (или максимальную) длину.



Аналогичная ситуация возникает, например, при измерении высоты облаков над уровнем земли или уровня воды в парогенераторе тепловой или атомной электростанции. Для корректной постановки задачи измерений в этих случаях необходимо определить математическую модель границы облаков и уровня земли или границы между водой и перегретым паром. В противном случае результат измерений будет содержать неопределенность, равную неопределенности математического определения указанных границ и уровней.

*Объект измерения – вал.* Сечение вала идеальным кругом не является. При постановке задачи измерения диаметра поперечного сечения такого вала рассматриваемая погрешность определяется отличием формы поперечного сечения от круговой вне зависимости от точности применяемого средства измерений.

*Объект измерения – помещение.* При трактовке результата измерения температуры в одной точке как температуры воздуха в данном помещении возникает погрешность, равная разности между максимальной и минимальной температурами, вне зависимости от точности применяемого термометра. Варианты корректной постановки задачи измерений:

измерить температуру воздуха в конкретной точке,

измерить минимальную (или максимальную) температуру воздуха в помещении,

измерить среднюю температуру воздуха в помещении.

*Объект измерения – акватория Ладожского озера.* Задача – измерение концентрации загрязнений воды (токсичных веществ, или нефтепродуктов, или ионов тяжелых металлов и т. д.). Ситуация аналогична предыдущей. Если результат количественного химического анализа пробы, изъятый в одном месте, распространяется на всю акваторию, рассматриваемая погрешность будет определяться неравномерностью содержания исследуемого загрязнения по всему озеру, каким бы точным не был этот конкретный анализ,

**Пример 2.** Погрешность  $e_2$ , вызванная взаимодействием средства измерений с объектом.

Примеры этой составляющей погрешности применения приведены выше в разделе 2.5.



**Пример 3.** Погрешность  $e_3$ , вызванная пульсациями измеряемой величины и помехами.

Эта погрешность возникает при измерении среднего значения пульсирующего давления, среднего значения выпрямленного переменного напряжения, при измерении малых напряжений в условиях действия помех, а также при преобразовании слабых сигналов измерительной информации, например выходных сигналов датчиков в условиях энергоемкого промышленного производства.

### 3.1.3. Частная метрологическая структурная схема.

#### Измерительный канал линейный

Метрологическая схема измерений существенно упрощается (рис. 10).

Поскольку  $f_p(x) = K_p x$ ,  $f(x) = Kx$ ,  $f'_p(x) = K_p$ ,  $f'(x) = K$ ,

$\Delta f(x) = f_p(x) - f(x) = K_p x - Kx = \Delta Kx$ , выражение (5) для абсолютной погрешности результата измерений приобретает вид

$$\Delta x = \frac{\Delta K}{K} x + e + \varepsilon, \quad (9)$$

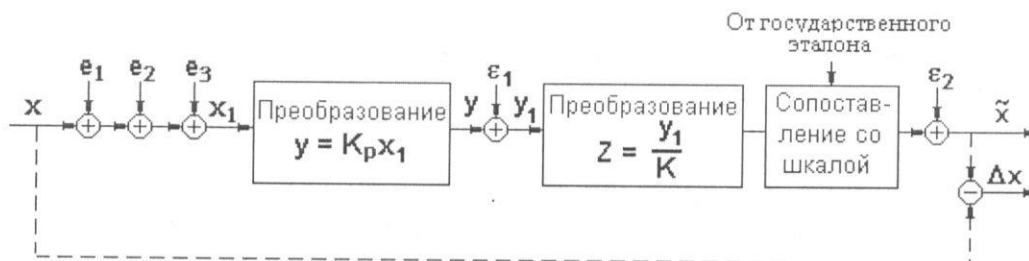


Рис. 10. Метрологическая структурная схема прямых измерений.  
Средство измерений линейное

где  $\Delta K = K_p - K$  — абсолютная погрешность коэффициента преобразования, вызванная разбросом его значений на множестве средств измерений данного типа,  $e$  — погрешность, возникающая при применении средства измерений,  $\varepsilon$  — собственная абсолютная аддитивная погрешность средства измерений (инструментальная абсолютная аддитивная погрешность)

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon}{K} + \varepsilon .$$

Первое слагаемое равенства (9) линейно зависит от измеряемой величины и представляет собой произведение относительной погрешности коэффициента преобразования на значение измеряемой величины. Поэтому данная составляющая погрешности называется *мультипликативной составляющей погрешности* или *мультипликативной погрешностью*.

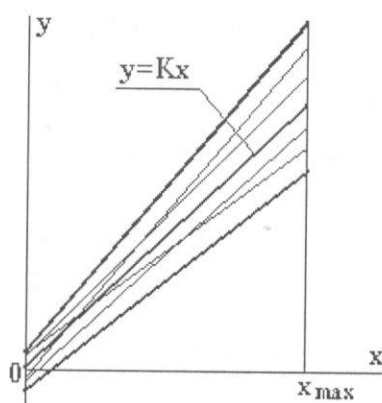


Рис. 11. Пример разброса функций преобразования линейных средств измерений

Второе и третье слагаемые не зависят от измеряемой величины, в сумме эти слагаемые образуют *аддитивную составляющую погрешности* или *аддитивную погрешность результата измерений*. Последнее слагаемое порождено собственными свойствами средства измерений является *аддитивной погрешностью средства измерений*. Точно так же исключительно свойствами средства измерений порождена мультипликативная составляющая погрешности (9). В связи с этим, как было отмечено в разделе 3.1.1, *инструментальная составляющая абсолютной погрешности* или *инструментальная погрешность*

$$\Delta_{\text{инст}} x = \frac{\Delta K}{K} x + \frac{\varepsilon}{K} + \varepsilon \quad (10)$$

Характеристикой разброса коэффициентов преобразования на множестве средств измерений одного типа является предельное допускаемое значение  $\Delta_K$ , такое, что:

$$|K_p - K| = |\Delta K| \leq \Delta_K . \quad (11)$$

При выполнении условия (11) разброс функций преобразования подобных средств измерений на множестве однотипных экземпляров будет иметь вид, показанный на рис. 11.

Границы интервала погрешности – расходящиеся прямые линии (см. рис. 11). В самом деле, используя обозначения предельных значений составляющих погрешности, введенные в разделе 3.1.1, получим линейное

выражение для границ интервала  $(-\Delta_x, +\Delta_x)$ , содержащего (может быть, с некоторой вероятностью) значение абсолютной погрешности результата измерений:

$$\Delta_x \leq \frac{\Delta_K}{K} x + \Delta_e + \Delta_\varepsilon, \quad \text{где}$$

$\Delta_\varepsilon$  - предельное значение аддитивной

погрешности: 
$$\left| \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon.$$

Абсолютная инструментальная погрешность средства измерений лежит (может быть, с некоторой вероятностью) в пределах  $(-\Delta_{\text{инст}}, +\Delta_{\text{инст}})$ , где

$$\Delta_{\text{инст}} = \frac{\Delta_K}{K} |x| + \Delta_\varepsilon. \quad (12)$$

Предельное значение  $\gamma_x$  относительной погрешности результата измерений выражается формулой

$$\left| \frac{\Delta x}{x} \right| \leq \gamma_x = \frac{\Delta_K}{K} + \frac{\Delta_\varepsilon}{x} + \frac{\Delta_e}{x},$$

правая часть которой есть сумма предельно допускаемых относительных погрешностей коэффициента преобразования  $K$ , аддитивной погрешности  $\varepsilon$  и погрешности применения  $e$ .

Здесь характеристика относительной мультипликативной составляющей уже не зависит от измеряемой величины и равна предельному значению относительной погрешности коэффициента преобразования  $\gamma_K = \frac{\Delta_K}{K}$ .

Аддитивные составляющие содержат значение измеряемой величины в знаменателе, а это значит, что относительная погрешность результатов измерения увеличивается при уменьшении значений измеряемой величины.

Соответствующая область возможных значений абсолютной погрешности измерений показана в верхней части рис. 12, где  $x_{\text{max}}$  - верхний

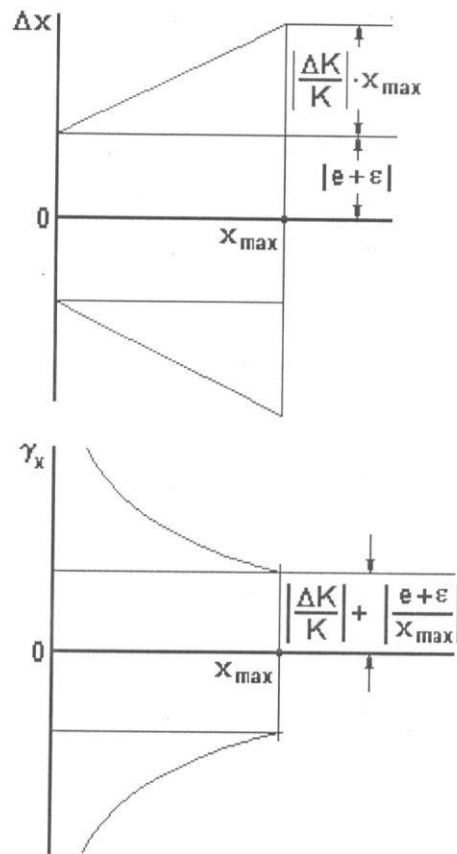


Рис. 12. Характеристики погрешности измерений



предел диапазона измерения. В нижней части рис. 12 показана область возможных значений относительной погрешности.

В рассмотренном случае нормы на две составляющие инструментальной погрешности обычно устанавливают отдельно: на относительную погрешность коэффициента преобразования и на аддитивную составляющую погрешности средства измерений. Именно так нормируется инструментальная погрешность линейных средств измерений в зарубежной практике:

норма  $\gamma_K$  устанавливается на относительную погрешность коэффициента преобразования в процентах (gain error):

$$\left| \frac{\Delta K}{K} \right| 100\% \leq \gamma_K \quad (13)$$

норма  $\Delta_\varepsilon$  устанавливается на абсолютное значение аддитивной погрешности в единицах измеряемой величины (offset error):

$$\left| \frac{\varepsilon_1}{K} + \varepsilon_2 \right| \leq \Delta_\varepsilon.$$

В отечественной практике применяется иное нормирование инструментальной погрешности линейных средств измерений: нормируется относительная инструментальная погрешность средства измерений с помощью двучленной формулы (вывод двучленной формулы см. далее в разд. 3.5.2):

$$\left| \frac{\Delta_{\text{инст}}}{x} \right| 100\% \leq c + d \left( \left| \frac{x_{\text{max}}}{x} \right| - 1 \right), \quad (14)$$

где  $x_{\text{max}}$  – максимальное значение измеряемой величины в диапазоне измерения,  $x$  – истинное значение измеряемой величины, на практике вместо него используется результат измерения,

$$d = \left| \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{\text{max}}} \right| 100\%, \quad c = \left( \left| \frac{\Delta_K}{K} \right| 100\% + d \right). \quad (17)$$

Раскрывая скобки в (16) с учетом обозначений (17), получим ограничение, накладываемое этой формулой на относительную инструментальную погрешность средства измерений:

$$\left| \frac{\Delta_{\text{инст}}}{x} \right| 100\% \leq \left| \frac{\Delta K}{K} \right| 100\% + \left| \frac{\Delta_\varepsilon}{x} \right| 100\%,$$

что согласуется с (13). Сравнение зарубежных и отечественных методов нормирования показывает, что при отечественном нормировании пользователю предоставляется более наглядная и полная информация об инструментальной погрешности средства измерений.

### 3.1.4. Частная метрологическая структурная схема.

#### Отличие функции преобразования измерительного канала от линейной незначительно

Ранее в разделе 3.1.3 был рассмотрен идеализированный случай линейного средства измерений. Однако в большинстве случаев, несмотря на стремление добиться линейной функции преобразования, все-таки незначительная нелинейность у многих средств измерений остается. Тем не менее, если это целесообразно, подобные средства измерений декларируются

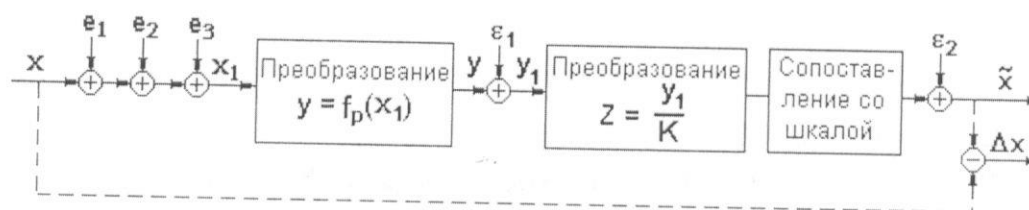


Рис. 13. Метрологическая структурная схема прямых измерений. средство измерений незначительно отличается от линейного.

в рекламной и сопроводительной документации, как линейные, а остаточная нелинейность входит в состав инструментальной погрешности. Рассмотрим описанную ситуацию с помощью метрологической структурной схемы (рис. 13). Эта схема отличается от схемы, представленной на рис. 10, лишь первой операцией.

Реальные функции  $y = f_p(x_1)$  нелинейного преобразования измеряемой величины, возмущенной погрешностями  $e = e_1 + e_2 + e_3$  (то есть погрешностями применения) отличаются от линейной функции  $y = Kx_1$  незначительно, так, что модуль разности между ними при всех значениях

измеряемой величины из диапазона измерений не превосходит некоторого значения  $\Delta_f$ , которое составляет лишь часть общей инструментальной погрешности:

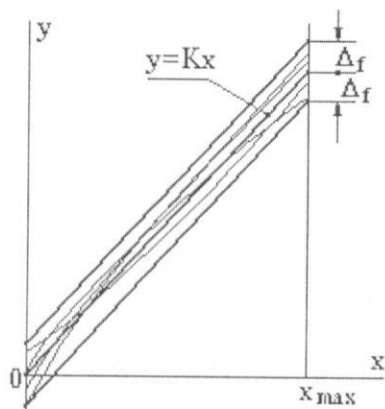


Рис. 14. Пример разброса функций преобразования внутри допустимых пределов

$$|f_p(x_1) - Kx_1| \leq \Delta_f,$$

где  $K$  – номинальный коэффициент преобразования, объявленный в документации.

Зона, в которой должны находиться реальные функции преобразования, представлена на рис. 14. Эта зона порождена погрешностями воспроизведения функции преобразования из-за неточности изготовления и старения комплектующих изделий, ее изменением под воздействием внешних влияющих факторов, а также разбросом на множестве экземпляров средств измерений.

ний.

Применяя к рассматриваемому случаю обозначения, использованные в (5), получим равенство для абсолютной погрешности измерения:

$$\Delta x = \frac{f_p(x+e) - Kx}{K} + \varepsilon = \frac{f_p(x+e) - K(x+e)}{K} + e + \varepsilon.$$

По аналогии с неравенством (7) и с теми же обозначениями устанавливаются граничные значения для абсолютной погрешности:

$$|\Delta x| \leq \frac{|\Delta_f|}{K} + \Delta_e + \Delta_\varepsilon. \quad (16)$$

Как видим, в этом случае, как и в разделе 3.1.1, мультипликативная составляющая погрешности не выделяется. В силу непредсказуемого различия реальных функций преобразования у различных экземпляров средств измерений здесь вся погрешность считается аддитивной, и максимально возможное или допустимое значение правой части неравенства (16) принимается в качестве предельного значения погрешности измерений во всем диапазоне измерений.



Простым делением обеих частей неравенства (16) на  $x$  получаем выражение для пределов допускаемой относительной погрешности:

$$|\gamma_x| \leq \frac{|\Delta_f|}{Kx} + \frac{\Delta_e}{x} + \frac{\Delta_\varepsilon}{x}.$$

Для средств измерений с незначительной нелинейностью нормируется приведенная погрешность, то есть абсолютная погрешность, отнесенная к максимальному значению измеряемой величины в диапазоне измерения:

$$\left| \frac{\Delta_{\text{инст}}}{x_{\text{max}}} \right| 100\% \leq \left| \frac{\Delta_f}{Kx_{\text{max}}} \right| 100\% + \left| \frac{\Delta_\varepsilon}{x_{\text{max}}} \right| = \gamma_{\text{прив}}$$

## 3.2. Динамический режим измерений, прямые измерения

### 3.2.1. Применяемые средства измерений

Номенклатура средств измерений, применяемых для измерения мгновенных значений изменяющейся во времени измеряемой величины, ограничена. Стрелочные приборы или иные приборы, снабженные индикаторами (такие, например, как ртутные термометры), в силу своей инерционности и длительности визуального отсчитывания показаний не позволяют измерять значения величин, изменяющихся во времени с заметной скоростью. То же самое относится к цифровым приборам, на входе которых может находиться инерционный аналоговый преобразователь, например, фильтр или интегратор, а для визуального считывания показаний цифрового прибора и их записи необходимо значительное время.

По этим причинам для измерения мгновенных значений изменяющихся измеряемых величин применяются следующие средства измерений:

аналоговые регистрирующие приборы с непрерывной или дискретной записью результатов,

быстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП) в комплекте с устройствами памяти (например, сопряженные с процессором или с компьютером), в которые записывается каждый полученный результат,

измерительные информационные системы, каждый измерительный канал которых, по сути, выполняет функции аналогового и последующего

аналого-цифрового преобразования измеряемой величины с записью результатов в память компьютера, при выводе этих результатов на дисплей в реальном времени такие каналы, по сути, являются цифровыми осциллографами.

Корректный метрологический анализ погрешностей измерения изменяющихся величин возможен при условии, что в применяемых средствах измерений выполняются *линейные преобразования измеряемой величины*. В этом случае для анализа погрешностей могут использоваться частотные методы, аппарат передаточных функций и интегральных операторов типа свертки. Измеряемые величины, погрешности и помехи на метрологических структурных схемах представляются, как функции времени.

### **3.2.2. Метрологическая структурная схема прямых измерений мгновенных значений измеряемой величины**

Преобразование изменяющихся во времени величин (далее – сигналов), выполняемое физическими устройствами, приводит к искажению формы сигналов вследствие того, что частотная характеристика любого физически реализуемого преобразователя неравномерна. Это означает, что коэффициенты преобразования различных гармонических составляющих входного сигнала различны. С увеличением частоты коэффициент преобразования в итоге уменьшается вплоть до нуля. Во временной области процесс преобразования описывается интегральным оператором типа свертки, который при нулевых начальных условиях имеет вид

$$y(t) = \int_0^t k(t-\tau)x_1(\tau)d\tau, \quad (17)$$

где  $k(t-\tau)$  – ядро оператора, а в теории измерений и автоматического управления – *импульсная переходная функция* или *весовая функция*. Это преобразование показано на метрологической структурной схеме рис. 15, где использованы все обозначения, принятые ранее в разделе 3.1.1. Индекс ‘р’ у обозначения импульсной переходной функции означает, что в составе конкретного экземпляра средства измерений используется реальный преобразователь. Характеристики реальных преобразователей на множестве всех экземпляров имеют разброс, вызванный теми же причинами, которые

перечислены выше в разделе 3.1.1 в отношении реального коэффициента преобразования.

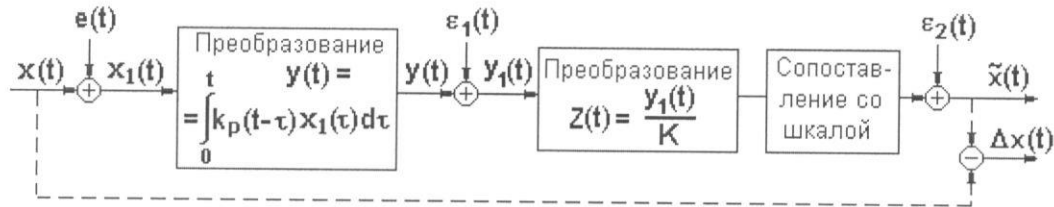


Рис. 15. Метрологическая структурная схема прямых измерений изменяющихся величин. Средство измерений линейное аналоговое

Отличие настоящей схемы от предыдущих состоит лишь в том, что в данной схеме все величины зависят от времени, а погрешности применения, действующие на входе средства измерений, обозначены единым символом  $e(t)$ .

Сигнал, полученный в итоге первого преобразования, подвергается масштабированию с коэффициентом  $K$ , принятым в качестве номинального для данного средства измерений. После этого выполняется сопоставление со шкалой и регистрация значений измеряемой величины на носителе информации (диаграммной ленте, фотопленке, магнитной пленке и т.п.) в единицах ее измерения. В ходе неизбежной расшифровки полученной непрерывной записи результатами измерений оказываются дискретные значения, а в состав погрешности  $\varepsilon_2$  входит погрешность расшифровки.

В соответствии с приведенной схемой (рис. 15) погрешность прямого измерения мгновенных значений изменяющейся измеряемой величины может быть записана в виде равенства

$$\Delta x(t) = \frac{1}{K} \left[ \int_0^t k_p(t-\tau) x(\tau) d\tau \right] + \frac{1}{K} \int_0^t k_p(t-\tau) e(\tau) d\tau + \frac{\varepsilon_1(t)}{K} + \varepsilon_2(t) - x(t),$$

Откуда

$$\Delta x(t) = \frac{1}{K} \left[ \int_0^t k_p(t-\tau) x(\tau) d\tau - Kx(t) \right] + \frac{1}{K} \int_0^t k_p(t-\tau) e(\tau) d\tau + \frac{\varepsilon_1(t)}{K} + \varepsilon_2(t) \quad (18)$$

Применяя к равенству (18) преобразование Фурье, получим выражение для комплексного спектра погрешности измерения через спектры сиг-



налов и реальную комплексную частотную характеристику преобразователя  $K_p(j\omega)$ :

$$\Delta x(j\omega) = \frac{1}{K} [K_p(j\omega) - K] x(j\omega) + \frac{K_p(j\omega)}{K} e(j\omega) + \frac{\varepsilon_1(j\omega)}{K} + \varepsilon_2(j\omega), \quad (19)$$

где частотные характеристики суть преобразования Фурье соответствующих импульсных переходных характеристик:

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} k(t) e^{-j\omega t} dt, \quad K_p(j\omega) = \int_0^{\infty} k_p(t) e^{-j\omega t} dt$$

Как видно, структура правой части равенств (18) и (19) аналогична структуре правых частей равенств (5), (6). Мало того, равенство (5) есть частный случай (18) и (19), поскольку при неизменной во времени измеряемой величине (или неизменном сигнале измерительной информации), то есть при  $\omega = 0$

$$K(0) = \int_0^{\infty} k(t) dt = K, \quad K_p(0) = \int_0^{\infty} k_p(t) dt = K_p,$$

$$\int_0^t k_p(t-\tau) x d\tau = x K_p, \quad \int_0^t k_p(t-\tau) e d\tau = e K_p.$$

Первые слагаемые в правой части каждого из равенств (18) и (19) представляют собой погрешности, вызванные двумя причинами: разбросом импульсных переходных и комплексных частотных характеристик на множестве экземпляров и их нестабильностью, а также отличием реального преобразования от идеального безинерционного, то есть такого, когда частотная характеристика практически не отличается от единицы, и тогда форма сигнала  $x(t)$  не искажается. Эта вторая причина вносит наибольший вклад в погрешность результата измерения мгновенных значений быстропеременных величин, если их спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя.

Вторые слагаемые в формулах (18) и (19) своим происхождением обязаны погрешности применения, которая претерпела то же преобразование, что и измеряемая величина, и если ее спектр выходит за пределы частотной полосы преобразователя, то она частично фильтруется. Получившаяся