

**В.В. Коротаяев**

**ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ  
ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2011**

## Содержание

Содержание .....	3
Введение .....	4
1.1 Измерения и измерительная информация.....	4
1.2 Классификация и терминология средств измерительной техники....	6
1.3 Классификация элементов структурных схем .....	9
1.4 Структурные схемы измерительных приборов. Общие требования и принципы построения .....	10
1.5 Функция преобразования .....	11
1.6 Статическая характеристика и чувствительность .....	12
1.7 Истинная, индивидуальная и номинальная функции преобразования, погрешность измерительного преобразователя .....	13
1.8 Типичные структуры приборов и соединения их звеньев .....	14
1.9 Погрешность средств измерений.....	17
1.10 Классификация погрешностей.....	18
1.11 Составляющие статической погрешности средств измерений .....	22
1.12 Составление уравнения погрешностей измерительных цепей .....	27
1.13 Виды точностных расчетов. Методы суммирования погрешностей .....	31
1.14 Нормируемые метрологические характеристики средств измерений .....	33
1.15 Критерий рациональных комплексов НМХ средств измерений ...	36
1.16 Определение статистических характеристик погрешности средств измерений .....	38
Литература.....	41

## Введение

Учебное пособие предназначено для студентов по направлению подготовки бакалавров и магистров 200200 – «Оптотехника» и по специальности 200203 - "Оптико-электронные приборы и системы" по ГОС-2.

Учебное пособие предназначено также для студентов по направлению подготовки бакалавров и магистров 200400 – «Оптотехника» и по специальности 200401 - "Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения" по ФГОС.

### 1.1 Измерения и измерительная информация

*Измерение* – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

*Физическая величина (величина)* – характеристика одного из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общая в качественном отношении многим физическим объектам, но в количественном отношении индивидуальная для каждого объекта, например, геометрические размеры, масса, температура.

Индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что значение величины или размер величины может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого.

*Результат измерения* – значение физической величины, полученное путем ее измерения. Результат измерения выражают в единицах физической величины.

*Единица физической величины* – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных величин.

Различают основные, производные, кратные, дольные когерентные (скорость – м/с), системные, внесистемные единицы.

*Истинное значение физической величины  $x_{и}$*  – значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующую физическую величину.

Это понятие соотносимо с понятием абсолютной истины, которая познается только в результате бесконечного познания.

Истинное значение величины также может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений. Для каждого уровня развития измерительной техники мы можем знать только действительное

значение физической величины, которое является аналогом понятия относительной истины.

*Действительное значение физической величины  $x_d$*  – значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что для поставленной измерительной задачи может его заменить.

Погрешность измерения – отклонение результата измерения ( $x_{изм}$ ) от действительного  $x_d$  (истинного  $x_{ист}$ ) значения измеряемой величины:

$$\Delta x_{изм.д} = x_{изм} - x_d, \quad (0.1)$$

$$\Delta x_{изм.и} = x_{изм} - x_{ист} \quad (0.2)$$

В практике измерений вместо истинного значения используют действительное значение, которое настолько близко к истинному, что в той или иной степени приближения заменяет его. Поэтому в практических расчетах применяют действительную погрешность измерения  $x_{изм.д}$ . Величину  $x_{изм.и}$  применяют в теоретических исследованиях; ее еще можно назвать истинной погрешностью измерения.

Соотношение между истинной  $\Delta x_{изм.и}$  и действительной погрешностями

$$|\Delta x| = |\Delta x_{изм.д}| + |\Delta x_{изм.и}|, \quad (0.3)$$

где  $\Delta x$  погрешность аттестации (эталона)

$$\Delta x = x_d - x_{ист} \quad (0.4)$$

Следует учитывать, что может быть  $x_{изм.д} > x_d$ , а  $x_d > x_{ист}$ . (см. рис. 1.1)

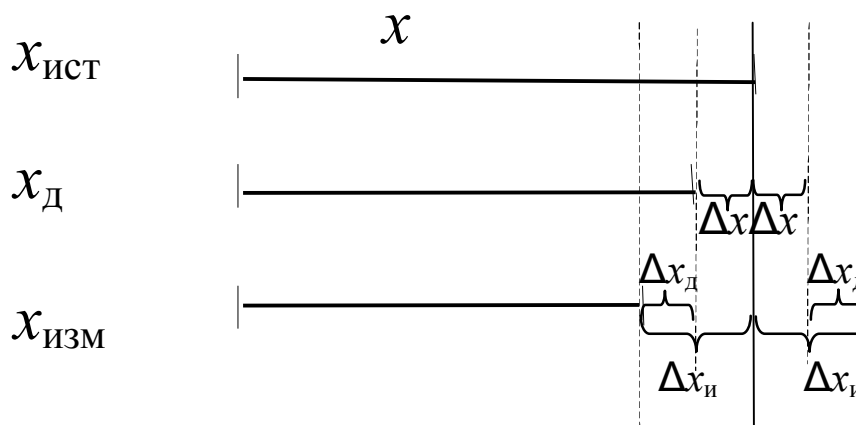


Рисунок 0.1

*Точность измерений* – характеристика качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности его результата. То есть, точность величина обратная погрешности.

Вернемся к определению понятия измерение.

*Измерение физической величины* – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической

величины, заключающихся в сравнении (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей с целью получения значения этой величины (или информации о нем) в форме, наиболее удобной для использования.

## **1.2 Классификация и терминология средств измерительной техники**

*Средства измерительной техники* – обобщающее понятие, охватывающее технические средства, специально предназначенные для измерений. К ним относят средства измерений и их совокупности, измерительные преобразователи, измерительные принадлежности, измерительные устройства.

*Средство измерений* – техническое средство (или их комплекс), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Это определение означает, что измерять можно лишь тогда, когда техническое средство может хранить единицу, достаточно неизменную по размеру.

По метрологическому назначению средства измерений делятся на:

– рабочие средства измерений, предназначенные для измерения физических величин в народном хозяйстве (они являются самыми многочисленными);

– метрологические средства измерений, предназначенные для обеспечения единства измерений в стране.

По конструктивному исполнению средства измерений подразделяются на: меры; измерительные приборы; измерительные установки; измерительные системы; измерительные комплексы.

По уровню автоматизации различают: неавтоматические средства измерений; автоматизированные средства измерений; автоматические средства измерений.

По уровню стандартизации различают: стандартизованные средства измерений; нестандартизуемые средства измерений.

По отношению к измеряемой физической величине различают: основные средства измерений; вспомогательные средства измерений.

*Рабочее средство измерений* – средство измерений, предназначенное для измерений, не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерений.

К рабочим средствам измерений относят средства измерений, применяемые в научных целях, при контроле параметров продукции и технологических процессов; в астрономии и геодезии; на транспорте; в

медицине; технике безопасности и охране окружающей среды; при поиске полезных ископаемых и учете различных видов сырья; в сельском хозяйстве и спорте и других видах деятельности, где необходимо получить значение той или иной физической величины. Например, теодолит, светодальномер, угломер, поляриметр, фотометр, пирометр.

*Метрологическое средство измерений* – средство измерений, предназначенное для метрологических целей: воспроизведение единицы и (или) ее хранения или передачи размера единицы рабочим средствам измерений.

К метрологическим средствам измерений относят эталоны, рабочие эталоны, поверочные установки, средства сравнения (компараторы и др.), стандартные образцы.

*Основное средство измерений* – средство измерений той физической величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей. Например, автоколлиматор при измерении углов поворота.

*Вспомогательное средство измерений* – средство измерений той физической величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерений необходимо учесть для получения результатов измерений требуемой точности. Например, термометр для учета температурной деформации объекта.

По уровню стандартизации различают следующие.

*Стандартизованное средство измерений* – средство измерений, изготовленное в соответствии с требованиями государственного или отраслевого стандарта.

Обычно технические характеристики стандартизованного средства измерений соответствуют техническим характеристикам установленного типа средства измерений, полученным на основании государственных испытаний.

Средства измерений, внесенные в Государственный реестр средств измерений, как правило, относятся к числу стандартизованных.

*Нестандартизуемое средство измерений (НСИ)* – уникальное средство измерений, предназначенное для специальной измерительной задачи, в стандартизации требований к которому нет необходимости.

Нестандартизуемые средства измерений не подвергаются государственным испытаниям, а подлежат метрологической аттестации.

*Измерительный прибор (прибор)* – средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

Измерительный прибор, как правило, содержит устройство для преобразования измеряемой величины в сигнал измерительной информации и его индикации в форме удобной для восприятия.

*Измерительное устройство (ИУ)* – часть измерительного прибора (установки, системы), имеющая обособленную конструкцию и назначение.

По степени индикации значений измеряемой величины измерительные приборы разделяют на показывающие и регистрирующие.

*Показывающий измерительный прибор* измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний значений измеряемой величины. Примеры: микрометр, аналоговый или цифровой вольтметр.

По форме представления отсчета измерительные приборы разделяются на аналоговые и цифровые.

*Регистрирующий измерительный прибор* – измерительный прибор, в котором предусмотрена регистрация показаний.

Регистрация значений может быть в аналоговой или числовой форме. Различают самопишущие и печатающие приборы.

*Измерительный прибор сравнения* – измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно.

Примеры: равноплечные весы, электроизмерительный потенциометр, компаратор для линейных мер, (фотометрическая головка).

*Стандартный образец (СО)* – образец вещества (материала) с установленными в результате метрологической аттестации значениями одной или более величин, характеризующими свойство или состав этого вещества (материала).

Различают стандартные образцы свойств и стандартные образцы состава. Стандартные образцы вносят в Государственный реестр стандартных образцов.

*Средство сравнения* – средство измерений, техническое средство или специально создаваемая среда, дающие возможность выполнять сличения друг с другом мер однородных величин или же показаний измерительных приборов.

Примеры: рычажные весы с образцовой гирей, переводимый эталон сравнения единицы ЭДС, предназначенный для сличений национальных эталонов вольта с международным.

*Компаратор* – средство сравнения, предназначенное для сличения мер однородных величин.

Пример: рычажные весы.

*Индикатор* – техническое средство или вещество, предназначенное для установления наличия какой-либо физической величины или определения её порогового значения.

*Измерительная установка (установка)* – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенных для измерения одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте.

Измерительную установку с включенным в нее образцовым средством измерений и применяемую для поверки называют *поверочной установкой*.

Измерительную установку, входящую в состав эталона, называют *эталонной установкой*.

*Измерительная система (ИС)* – совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого пространства (среды, объекта и т.п.) с целью измерений одной или нескольких физических величин.

### **1.3 Классификация элементов структурных схем**

*Измерительный преобразователь (ИП)* – техническое средство, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или сигнал измерительной информации, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи и имеющее нормированные метрологические характеристики.

ИП или входит в состав какого-либо измерительного прибора (установки, системы и др.) или применяется с другим средством измерений.

По характеру преобразования различают: аналоговые, аналого-цифровые, цифро-аналоговые преобразователи.

По месту в измерительной цепи различают: первичные и промежуточные преобразователи.

*Первичный измерительный преобразователь (ПИП)* - измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, т.е. первый преобразователь в измерительной цепи измерительного прибора (установки, системы).

*Датчик* - конструктивно обособленный первичный измерительный преобразователь.

*Измерительная цепь* - совокупность элементов измерительного прибора, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода.

Измерительную цепь измерительной системы называют *измерительным каналом*.

*Структурная схема средства измерений* - условное обозначение измерительной цепи средства измерений с указанием преобразующих величин.

*Структурный элемент средства измерений* - элемент средства измерений, который выполняет в нем одну из ряда функций, связанных с измерением.

К структурным элементам относят такие как 1) чувствительный элемент, 2) преобразовательный элемент, 3) сравнивающее устройство, 4)



измерительный механизм, 5) отсчетное устройство, шкала, указатель, табло и т.д.

*Чувствительный элемент средства измерений* - часть первого в измерительном канале измерительного преобразователя, воспринимающая входной измерительный сигнал.

*Сравнивающее устройство средства измерений* - часть элементов средства измерений, обеспечивающая непосредственное сравнение сигналов от измеряемой и от известных однородных величин.

*Отсчетное устройство средства измерений* - часть элементов устройства измерений, показывающая значение измеряемой величины или связанных с ней величин. Отсчетное устройство может быть аналоговым или цифровым.

*Регистрирующее устройство средства измерений* - часть элементов средства измерений, которые регистрируют значение измеряемой или связанной с ней величины.

Отсчетное устройство цифрового измерительного прибора называется - *табло прибора* (табло).

#### **1.4 Структурные схемы измерительных приборов. Общие требования и принципы построения**

При разработке приборов следует руководствоваться принципами построения таких структурных и принципиальных схем, которые удовлетворяют общим требованиям к приборам: построены на современной элементной базе, учитывают тенденции развития приборостроения, являются оптимальными.

##### **Общие требования к приборам**

1. Погрешности приборов не должны превышать допускаемых значений, которые определяются областью применения и возможностью технической реализации.
2. В необходимых случаях погрешности, определяемые условиями эксплуатации должны компенсироваться автоматически.
3. Элементы приборов должны быть, по возможности, детектирующими, т.е. мощности выходных сигналов предыдущих звеньев должны быть значительно больше потребной мощности входных сигналов последующих звеньев.
4. Приборы должны обладать достаточной чувствительностью, надежностью, малыми энергопотреблением, массой, габаритными размерами.

При расчете и проектировании приборов рассматриваются две задачи.

1. Анализа, в котором по заданным характеристикам звеньев (элементов) прибора определяются характеристики прибора в целом.

2. Синтеза, когда по заданным характеристикам прибора определяются требуемые характеристики элементов.

Для решения задач анализа и синтеза приборов необходимо установить общие связи между характеристиками элементов и характеристиками прибора в целом.

Указанные задачи разбиваются на следующие этапы:

1. Выбор метода измерения.
2. Составление структурной схемы прибора, представляющей совокупность элементов, осуществляющих преобразования измерительных сигналов.
3. Определение статических и динамических характеристик элементов и прибора в целом и сравнение этих характеристик с требуемыми характеристиками с целью определения погрешностей.
4. Техническая реализация структурных схем в виде принципиальных схем.

Структурная схема прибора отображает не только совокупность элементов, осуществляющих элементарные преобразования, но и статические и динамические передаточные свойства.

## 1.5 Функция преобразования

Измерительный прибор осуществляет преобразование входного сигнала  $x(t)$  в выходной сигнал  $y(t)$ :

$$y(t) = f[x(t)] \quad (0.5)$$

где  $x(t)$  и  $y(t)$  - векторные величины;  $f(x)$  - функция преобразования прибора.

*Функция преобразования измерительного преобразователя* - зависимость информативного параметра выходного сигнала измерительного преобразователя от информативного параметра его входного сигнала.

Выражение (0.5) - информационная модель прибора, в которой осуществляется преобразование входной информации в выходную.

В общем случае прибор осуществляет операцию преобразования множества сигналов на входе  $x \in X$  в множество сигналов на выходе  $y \in Y$ . Такое преобразование производится, например, в измерительных телевизионных системах и тепловизионных системах.

Преобразование сигналов в приборе должно быть однозначным, однако, в реальных приборах функция преобразования зависит не только от сигнала  $x(t)$ , но также от значений параметров прибора  $q_i$ , которые, в свою очередь, зависят от параметров технологии изготовления прибора  $\eta_i(t)$ , и от влияющих физических величин  $\xi_k'(t)$ , а также от возмущений  $\xi''(t)$ , действующих непосредственно на сигнал  $x(t)$  и от помех  $\xi'''(t)$ , возникающих в самом приборе (шумы, паразитные ЭДС, емкости, индуктивности, силы трения и другие факторы):

$$y(t) = f [x, q_i (\eta, \xi'), \xi'', \xi'''] \quad (0.6)$$

где  $q, \eta, \xi, \xi', \xi''$  - совокупность векторных величин.

Следовательно, функциональная схема прибора имеет вид, показанный на рисунке:

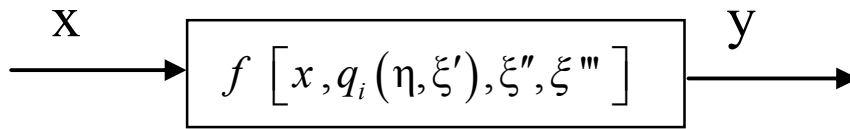


Рисунок 0.2 – Функциональная схема прибора

Измеряемыми величинами, на основе которых формируется полезный сигнал  $x(t)$ , являются параметры первичной информации: поток излучения (в фотометрах), температура (в пирометрах), линейные и угловые размеры, расстояния (в светодальномерах) и т. д.

К числу вредных факторов относятся неконтролируемые изменения температуры, влажности окружающей среды, наличие тумана, пыли, вибрации, электрические и магнитные поля, и т. д. Эти факторы вносят погрешности в показания приборов.

Прибор должен воспроизводить или отображать измеряемые величины с допускаемыми погрешностями. Под отображением понимается не только получение на выходе прибора величин, пропорциональных входным величинам, но и формирование заданных функций (квадратичных, логарифмических), или получение производных и интегралов от входных величин; формирование зрительных образцов, формирование управляющих сигналов, используемых для управления и контроля; запоминание и регистрация выходных сигналов.

При передаче информации от контролируемого объекта к отсчетному устройству сигналы изменяются по амплитуде и спектру и преобразуются из оптических в электрические. При этом ряд преобразований целесообразнее производить в оптическом канале, а другие преобразования целесообразнее производить с электрическими сигналами, которые являются универсальными.

## 1.6 Статическая характеристика и чувствительность

Статической характеристикой прибора называется зависимость между установившимися значениями измеряемой величины  $x$  и выходной величины  $y$  (1.5):

$$y(t) = f(x) \quad (0.7)$$

Чувствительностью прибора  $S$  называется отношение изменения выходного сигнала прибора  $\Delta y$  к вызвавшему его изменению измеряемой величины  $\Delta x$  при  $\Delta x \rightarrow 0$

$$S = \frac{dy}{dx} = f'(x) \quad (0.8)$$

Чувствительность прибора может быть также выражена через передаточную функцию  $W(p)$  при  $p \rightarrow 0$  или частотную характеристику  $H(w)$  при  $w \rightarrow 0$ , т. е.

$$S = W(0) = H(0) \quad (0.9)$$

Чувствительность может быть определена аналитически согласно выражениям (0.8) или (0.9) или графически с помощью касательной, проведенной в той точке характеристики, в которой определяется чувствительность. При этом

$$S = \frac{m_y}{m_x} \operatorname{tg} \theta \quad (0.10)$$

где  $\theta$  - угол наклона касательной к оси  $x$ ;  $m_x$  и  $m_y$  - масштабы графика по осям  $x$  и  $y$ .

Если функция преобразования  $f(x)$  линейна, то чувствительность одинакова во всех точках ( $S = \text{const}$ ).

### **1.7 Истинная, индивидуальная и номинальная функции преобразования, погрешность измерительного преобразователя**

Истинная функция преобразования  $f_{\text{ист}}(x)$  измерительного преобразователя - функция, совершенным образом отражающая зависимость информативного параметра выходного сигнала  $y$  конкретного экземпляра измерительного преобразователя от информативного параметра его входного сигнала в тех условиях и в тот момент времени, когда функцию определяют.

Истинная функция преобразования представляет собой идеальное понятие и, в общем, не может быть известна.

Индивидуальная функция преобразования измерительного преобразователя  $f_{\text{инд}}(x)$  - функция преобразования, принимаемая для конкретного экземпляра измерительного преобразователя и устанавливаемая, как правило, путем экспериментального исследования этого конкретного экземпляра при определенных значениях влияющих величин.

Индивидуальная функция преобразования должна, по возможности, приближаться к истинной функции преобразования.

Номинальная функция преобразования измерительного преобразователя  $f(x)$  - функция преобразования, принимаемая для любого экземпляра измерительного преобразователя данного типа и устанавливаемая в НТД на данный тип измерительного преобразователя.

(Используют в пределах рабочих условий применения для определения значения информативного параметра входного сигнала измерительного преобразователя по известному значению его выходного сигнала (или, наоборот) в тех случаях, когда данные о МХ измерительного преобразователя получают из НТД на данный тип измерительного преобразователя).

В достаточно общем виде истинную и номинальную (расчетную) функции преобразования можно представить в виде:

Истинная

$$y = f(x, q_1, q_2, \dots, q_n, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l), \quad (0.11)$$

Номинальная (расчетная)

$$y = f_0(x_0, q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}, \xi_{10}, \xi_{20}, \dots, \xi_{l0}), \quad (0.12)$$

где  $y$  и  $y_0$  - истинное и номинальное значение информативного параметра выходного сигнала соответственно;  $x$  и  $x_0$  - истинное и номинальное значение информативного параметра входного сигнала; совокупности  $q_1, q_2, \dots, q_n$  и  $q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}$  - истинные и номинальные значения конструктивных параметров прибора или его узлов и деталей; совокупности  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l$  и  $\xi_{10}, \xi_{20}, \dots, \xi_{l0}$  - истинные номинальные значения влияющих величин.

Влияющая физическая величина - физическая величина, измерение которой не предусмотрено данным средством измерений, но оказывающая влияние на результаты измерений физической величины, для которой предназначено средство измерений.

Погрешность измерительного преобразователя по выходу - разность между истинной (или индивидуальной) и номинальной функциями преобразования измерительного преобразователя.

$$\Delta y = y - y_0 = f(x, q_1, q_2, \dots, q_n, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_l) - f_0(x_0, q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}, \xi_{10}, \xi_{20}, \dots, \xi_{l0}) \quad (0.13)$$

## 1.8 Типичные структуры приборов и соединения их звеньев

Соединение звеньев в схеме прибора может быть (рис. 0.3) последовательным (а), параллельным согласным (б, в), параллельным встречным (г) и смешанным.

Если  $x_i$  и  $y_i$  - входной и выходной сигналы  $i$ -го элемента, то его функция преобразования (статическая характеристика)

$$y_i = f_i(x_i), \quad (0.14)$$

При последовательном соединении элементов (рис. 0.3а) функция преобразования прибора

$$y = f_n \{ f_{n-1} \dots f_2 [ f_1(x) ] \}. \quad (0.15)$$

Передаточная функция прибора

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p), \quad (0.16)$$

а чувствительность

$$S = \prod_{i=1}^n S_i. \quad (0.17)$$

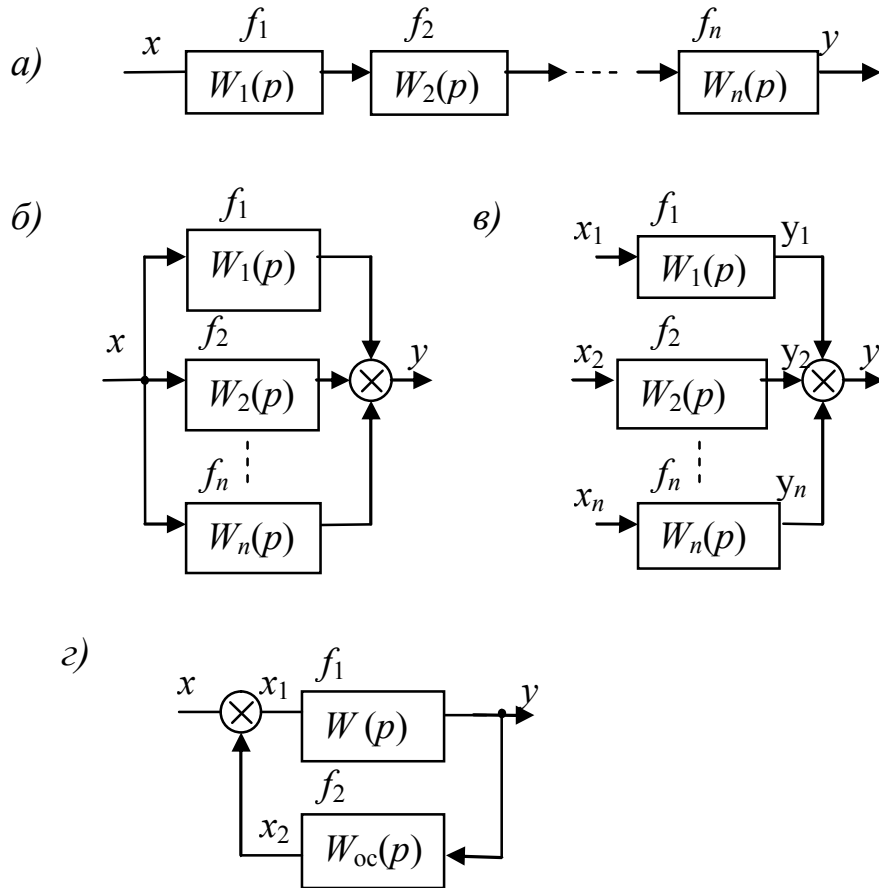


Рисунок 0.3 – Виды соединения звеньев

Параллельное соединение применяется в суммирующих и других вычислительных приборах. При таком соединении сигнал  $x$ , поступающий в элементы (рис. 0.3б, в), функционально преобразовывается в них, и затем результаты суммируются. Таким образом, можно формировать функциональные зависимости любой сложности.

При параллельном согласном соединении элементов (рис. 0.3б) функция преобразования прибора

$$y = \sum_{i=1}^n f_i(x), \quad (0.18)$$

$$y = \sum_{i=1}^n f_i(x_i). \quad (0.19)$$

Передаточная функция

$$W(p) = \sum W_i(p), \quad (0.20)$$

чувствительность

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (0.21)$$

Если прибор имеет несколько входов (рис. 0.3), то

$$y = \sum_{i=1}^n f_i(x_i), \quad (0.22)$$

$$y = \sum_{i=1}^n W_i(p)x_i. \quad (0.23)$$

При параллельно-встречном соединении элементов (рис. 0.3б) с обратной связью образуются замкнутые структурные схемы. Чаще используют отрицательную обратную связь, которая улучшает статические и динамические характеристики и повышает точность прибора.

Положительная обратная связь применяется в генераторах специальных колебаний, преобразователях с частотным выходом, в схемах широтно-импульсной модуляции.

Уравнения звеньев и уравнения связи имеют вид

$$\begin{aligned} y &= f_1(x), \\ x_2 &= f_2(y), \end{aligned} \quad (0.24)$$

$$x_1 = x \pm x_2.$$

Функция преобразования такой цепи

$$y = f_1(x \pm f_2(y)), \quad (0.25)$$

где знак "+" соответствует положительной обратной связи, а знак "-" соответствует отрицательной обратной связи

Передаточная функция и чувствительность

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p)W_{oc}(p)}, \quad (0.26)$$

$$S = \frac{S_1}{1 - (\pm S_1 S_2)}. \quad (0.27)$$

где знак "+" соответствует отрицательной обратной связи, а знак "-" соответствует положительной обратной связи.

Если в системе с отрицательной обратной связью  $S_1 \rightarrow \infty$ , то система становится компенсационной, так как при этом  $x_2 = x$  и установившийся сигнал  $x_1$  на входе становится равным нулю ( $x_1 = x - x_2 = 0$ ).

В этом случае чувствительность цепи

$$S = \lim_{S_1 \rightarrow \infty} \frac{S_1}{1 + S_1 S_2} = \frac{1}{S_2} \quad (0.28)$$

Этот случай соответствует, например, применению операционного усилителя или ручной компенсации.

Практическая реализация звена с бесконечно большой чувствительностью не обязательно связана с бесконечно большим усилением. Бесконечно большую чувствительность имеют астатические (интегрирующие) звенья, так как при сколь угодно малой величине входного сигнала их выходной сигнал непрерывно нарастает и с течением времени стремится к бесконечности.

Примером астатического звена первого порядка служит идеальный электродвигатель (с моментом трения равным нулю), если принять за входную координату подаваемое напряжение, а за выходную - угол поворота вала двигателя.

### 1.9 Погрешность средств измерений

*Погрешность средства измерений* – разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой величины.

Для рабочего средства измерений за истинное значение физической величины  $x$  принимают показания рабочего эталона измерений, для рабочего эталона - значение физической величины, полученное с помощью эталона.

Эталон содержит значительно меньшую погрешность, которой при сличении нередко пренебрегают. Поэтому, в общем виде разность в показаниях поверяемого и образцового средств измерений считают погрешностью поверяемого средства измерений:

$$\Delta x_{\text{п}} = x_{\text{п}} - x_{\text{д}} \quad (0.29)$$

где  $x_{\text{д}}$  - значение величины, полученное образцовым средством измерений (или эталоном) - действительное значение;  $x_{\text{п}}$  - значение той же самой величины, найденное с помощью поверяемого средства измерений.

Действительная погрешность определяемая экспериментально

$$\Delta x_{\text{пд}} = x_{\text{п}} - x_{\text{д}} \quad (0.30)$$

Истинная погрешность может быть определена теоретически

$$\Delta x_{\text{пи}} = x_{\text{п}} - x_{\text{и}} \quad (0.31)$$

Погрешность атестации

$$\Delta x_{\text{а}} = x_{\text{д}} - x_{\text{и}} \quad (0.32)$$

Следует различать понятия диапазон показаний и диапазон измерений средства измерений.

Диапазон показаний средства измерений - область значений шкалы прибора, ограниченная конечным  $x_{\text{кш}}$  и начальным  $x_{\text{нш}}$  значениями шкалы.

Диапазон измерений средства измерений - область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности средства измерений.



Значения величины, ограничивающие диапазон измерений снизу и сверху (слева и справа), называют соответственно нижним пределом измерений  $x_n$  и верхним пределом измерений  $x_v$ .

### 1.10 Классификация погрешностей

Погрешность приборов в зависимости от признаков, положенных в основу классификации, можно разделить на следующие группы.

1. Если в основу классификации положить **повторяемость погрешностей при многократных измерениях**, то все погрешности можно разделить на систематические и случайные.

*Систематическая погрешность* средства измерений - составляющая погрешности средства измерений, принимаемая постоянной или изменяющейся закономерно.

Систематическая погрешность данного средства измерений может отличаться от систематической погрешности другого экземпляра, поэтому для группы однотипных средств измерений эта составляющая может рассматриваться как случайная.

При нормировании систематической составляющей погрешности средств измерений нередко устанавливают пределы (максимальные значения) (плюс и минус) допускаемой систематической погрешности средств измерений данного типа.

Их появление может быть вызвано несовершенством методов измерения, схем и конструкций приборов. Влияние систематических погрешностей может быть заранее установлено и учтено. В современных приборах систематические погрешности компенсируются автоматически или учитываются при обработке результатов измерений.

*Случайная погрешность* средства измерений - составляющая погрешности средства измерений, изменяющаяся случайным образом, например, при повторных измерениях одной и той же величины.

Возникновение случайных погрешностей обусловлено случайными изменениями параметров в уравнениях методов измерения, случайными изменениями параметров приборов, влиянием внешних случайных воздействий, несовершенством технологии измерения и. т. п.

При нормировании случайной составляющей погрешности средств измерений какого либо типа часто устанавливают предел допускаемого значения (максимальное значение) средней квадратической погрешности средств измерений.

2. По способу выражения погрешности могут быть абсолютными и относительными.

*Абсолютной* называется погрешность средства измерений, выраженная в единицах измеряемой физической величины.

*Относительная погрешность* средств измерений есть погрешность средства измерений выраженная отношением его абсолютной погрешности

к истинному (действительному) значению измеряемой физической величины в пределах диапазона измерений.

$$\eta_x = \frac{\Delta x}{x} \quad (0.33)$$

Если характеристика прибора линейна и проходит через начало координат ( $y = S_x$ ) то

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta y}{y} = \eta \quad (0.34)$$

*Приведенная погрешность* средства измерений - отношение абсолютной погрешности  $\Delta x$  или  $\Delta y$  к соответствующей абсолютной величине диапазона средства измерений.

$$\xi_x = \frac{\Delta x}{x_d}, \quad \xi_y = \frac{\Delta y}{y_d} \quad (0.35)$$

**3. В зависимости от характера связи между погрешностью и уровнем измеряемого сигнала различают аддитивную и неаддитивную погрешности.**

Аддитивные погрешности не зависят от уровня измеряемых сигналов. Они возникают вследствие сдвига статической характеристики (рис 0.4) без изменения ее наклона. Неаддитивные погрешности зависят от уровня измеряемого сигнала и возникают при изменении наклона статической характеристики.

Неаддитивные погрешности делятся на мультипликативные, степенные и периодические.

Мультипликативная погрешность пропорциональна измеряемой величине

$$\Delta y_m = \frac{\Delta S}{S} y = ay \quad (0.36)$$

где  $\Delta S/S$  - относительное измерение чувствительности ( $\Delta S = S - S_0$ )

Степенная погрешность пропорциональна  $y^m$  (квадратическая  $\Delta y = cy^2$ , кубическая  $\Delta y = dy^3$ )

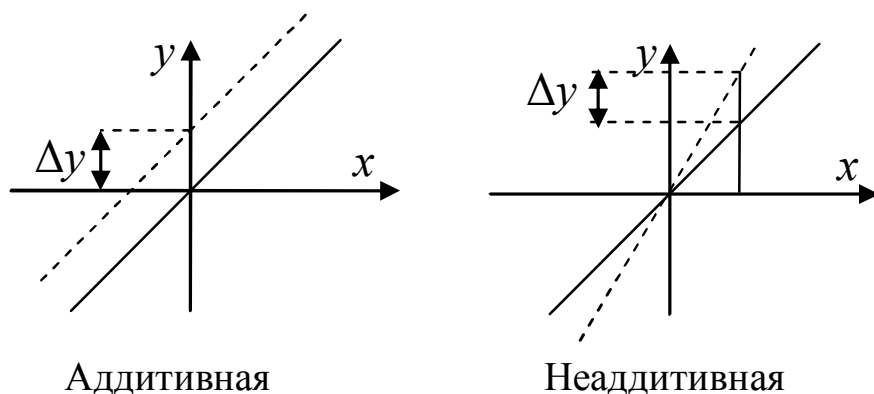


Рисунок 0.4 – Аддитивная и неаддитивная погрешности

Периодическая погрешность описывается периодической функцией сигнала

$$\Delta y = F(y + T), \quad (0.37)$$

где  $T$  - период функции. Такие погрешности часто возникают в механических преобразователях, например в круговых шкальных отсчетных устройствах.

В общем случае погрешность содержит несколько составляющих

$$\Delta y = a + by + cy^2 + dy^3 + \dots \quad (0.38)$$

и может быть рассчитана путем разложения функции (рис. 0.5) в степенной ряд путем обработки экспериментальных данных по методу наименьших квадратов.

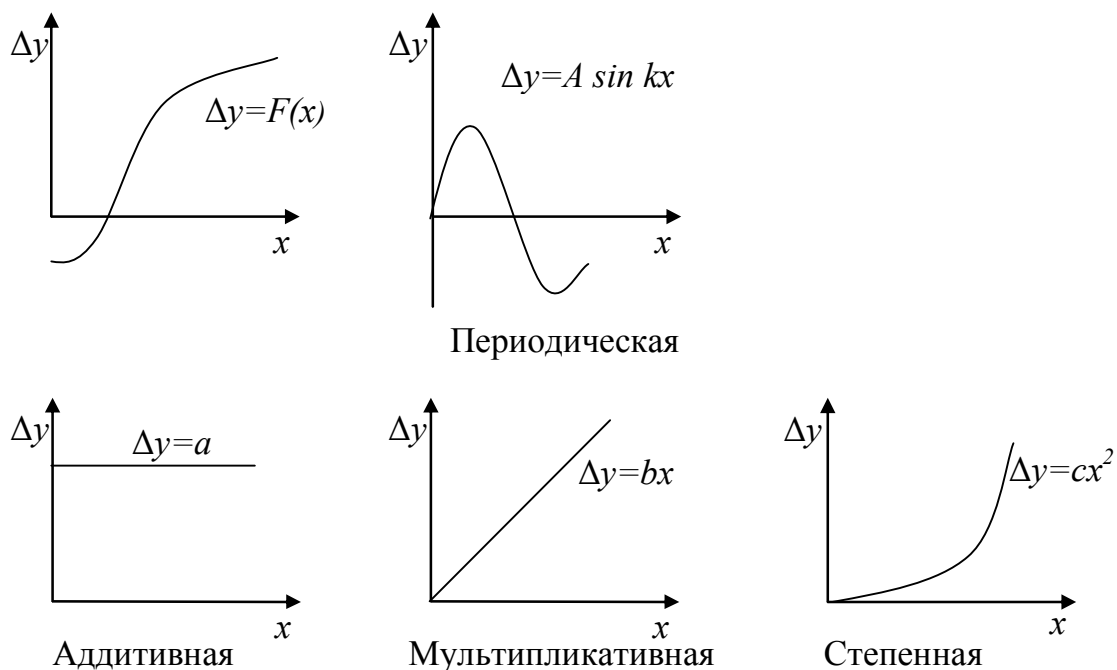


Рисунок 0.5 – Составляющие случайной погрешности

4. **В зависимости от причин, порождающих погрешности,** различают методические и инструментальные погрешности. Методические возникают от несовершенства методов измерения, из-за приближений, допускаемых при проектировании прибора, они не зависят от качества изготовления прибора и одинаковы для всех образцов данного типа.

*Погрешность метода измерений* - составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений.

Методические погрешности, в первую очередь, присущи приборам, основанным на косвенных методах измерений.

*Инструментальные погрешности* возникают из-за несовершенства технологического процесса изготовления прибора, из-за изменения параметров характеристик материалов, в процессе эксплуатации прибора, из-за влияния внешних возмущений (температуры, влажности, излучения фона электромагнитных полей), вследствие влияния нестабильности питания, вследствие наличия случайной составляющей погрешности, присущей самому прибору (шумовая погрешность ОЭП).

5. **По отношению к условиям применения** погрешности можно разделить на основные и дополнительные.

*Основная погрешность* - погрешность средства измерений, определяемая в нормальных условиях его применения.

*Нормальные условия* характеризуются совокупностью значений или областей значений влияющих величин, принимаемых за нормальные. Они устанавливаются в нормативно-технической документации на средства измерений конкретного вида (ГОСТы, ОСТы, нормали).

Например, давление воздуха  $(760 \pm 5)$  мм. рт. ст., температура воздуха  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ , влажность  $(20 \dots 80)\%$ , нормальное положение (горизонтальное или вертикальное), напряжение питания  $(220 \pm 5)$  В.

*Дополнительная погрешность средства измерений*  $\Delta u_{\text{доп}}$  - составляющая погрешности, дополнительно возникающая вследствие отклонения какой либо из влияющих величин от нормального от её значения или выхода за пределы нормальной области значений.

Следовательно, общая погрешность

$$\Delta u = \Delta u_{\text{осн}} + \Delta u_{\text{доп}} \quad (0.39)$$

*Рабочая область значений влияющей величины* - область значений, в пределах которой нормируют дополнительную погрешность или изменения показаний средства измерений.

*Предельные условия измерений* - условия измерений, характеризующиеся экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которое средство измерений может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

6. **По отношению к изменямости измеряемой величины** все погрешности можно разделить на статические и динамические.

*Статическая погрешность*  $\Delta u_{ст}$  средства измерений - погрешность средства измерений применяемого при измерении физической величины, принимаемой за неизменную.

*Динамическая погрешность*  $\Delta u_{дин}$  возникает дополнительно при измерении переменной физической величины и обусловлена несоответствием его реакции на скорость (частоту) изменения входного сигнала.

Следовательно, общая погрешность в неустановившемся режиме измерения

$$\Delta u = \Delta u_{ст} + \Delta u_{дин} \quad (0.40)$$

где  $\Delta u_{ст}$  – статическая погрешность,  $\Delta u_{дин}$  – динамическая погрешность.

*Дополнительная погрешность средства измерений*  $\Delta u_{доп}$  - составляющая погрешности, дополнительно возникающая вследствие отклонения какой либо из влияющих величин от нормального от её значения или выхода за пределы нормальной области значений.

Следовательно, общая погрешность

$$\Delta u = \Delta u_{осн} + \Delta u_{доп} \quad (0.41)$$

*Рабочая область значений влияющей величины* - область значений, в пределах которой нормируют дополнительную погрешность или изменения показаний средства измерений.

*Предельные условия измерений* - условия измерений, характеризуемые экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которое средство измерений может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

## 1.11 Составляющие статической погрешности средств измерений

### Методические погрешности

Погрешность метода измерений - составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятого метода измерений.

Методические погрешности, в первую очередь, присущи приборам, основанным на косвенных методах измерений.

Пусть величина  $x$ , подлежащая измерению, и величина  $x'$ , на которую реагирует прибор, связаны зависимостью

$$x = \varphi(x', l_1, \dots, l_j), \quad (0.42)$$

где  $l_i$  – параметры метода.

Пусть прибор градуируется при  $l_{j0}$ , а в процессе измерения параметры метода принимают значения  $l_i = l_{j0} + \Delta l_i$ , тогда отклонение информативного параметра входного сигнала от его истинного значения

$$x_m = x - x_0 = \varphi(x', l_j) - \varphi(x', l_{j0}) \quad (0.43)$$

После суммирования всех составляющих получим

$$\Delta x_M = \sum_{j=1}^m \left( \frac{dx}{dl_j} \right) \Delta l_j \quad (0.44)$$

Методическая погрешность ИП по выходу

$$\Delta y_M = \sum_{j=1}^m \left( \frac{dy}{dx_j} \right) \frac{dx}{dl_j} \Delta l_j \quad (0.45)$$

К методическим погрешностям следует также отнести такое фундаментальное свойство приборов как их влияние на информативный параметр входного сигнала.

Кроме того, одной из составляющей может быть погрешность метода поверки - погрешность применяемого метода передачи размера единицы при поверке, которая возникает при градуировке ИП по образцовым средствам измерений.

Методические погрешности не зависят от качества изготовления прибора, они одинаковы для всех образцов данного типа.

### **Погрешность приближения**

Возникает в результате того, что при проектировании приборов с целью их упрощения реализуется приближенная функция преобразования вместо заданной (идеальной).

Наиболее часто встречающимися примерами приближения является замена зависимостей типа  $y = kx$ ,  $y = k \sin x$ ,  $y = k \operatorname{tg} x$ ,  $y = \operatorname{arcsin} x$ ,  $y = \operatorname{arctg} x$  при малых значениях  $x$ .

В общем случае погрешность приближения

$$\Delta y_{\text{пр}} = f(x, q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}, \xi_{10}, \xi_{20}, \dots, \xi_{\ell 0}) - f_0(x, q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}, \xi_{10}, \xi_{20}, \dots, \xi_{\ell 0}) \quad (0.46)$$

Следует отметить, что истинная и номинальная функции преобразования рассчитываются от номинальных значений параметров и влияющих факторов.

Погрешность приближения имеет место в приборах с дискретным преобразованием непрерывного сигнала, например во времени, по уровню (АЦП и ЦАП), в пространстве (в матрице ПОИ).

Погрешность приближения, как правило, рассматривают как теоретическую инструментальную, но некоторые авторы рассматривают её как методическую [1].

### **Погрешности от несоответствия параметров прибора номинальным значениям (производственно-технологические)**

Эти погрешности возникают из-за неточности изготовления материалов, деталей, узлов.

Причинами, вызывающими отклонение параметров приборов от номинальных значений являются следующие:

1. Неидентичность технологических процессов и первичных компонентов, используемых при производстве материалов для деталей и узлов, что приводит к разбросу физических параметров, характеризующих свойства этих материалов (плотности, удельного электрического сопротивления, концентрации примесей в полупроводниках, показателя преломления оптических элементов и т. д.)

2. несовершенство технологических процессов и неточность оборудования, применяемых при изготовлении деталей и элементов приборов, что вызывает рассеивание геометрических размеров деталей и элементов.

3. несовершенство сборочных, регулировочных и контрольных устройств и операций, что обуславливает погрешности узлов и приборов при их сборке, юстировке, регулировке.

Производственно-технологические погрешности носят случайный характер.

Эти погрешности появляются в результате совокупного действия большого числа факторов, поэтому, при отсутствии доминирующих факторов, они часто имеют нормальное (гауссово) распределение

В результате отклонения параметров прибора от номинальных значений (производственно-технологические и внутренние дестабилизирующие факторы), истинная функция преобразования отличается от номинальной, поэтому возникает погрешность, которая в линейном приближении равна

$$\Delta y_{\text{ит}} = \sum_{j=1}^m \left( \frac{df_0}{dq_i} \right) \Delta q_i = \sum_{i=1}^n A_i \Delta q_i \quad (0.47)$$

где производные  $A_i = (df_i/dq_i)$  называются коэффициентами влияния, которые рассчитываются при номинальных значениях параметра, а  $\Delta q_i$  - первичная погрешность параметра  $q_i$  ( $\Delta q_i = q_i - q_{i0}$ ).

### **Погрешность от действия внутренних дестабилизирующих факторов**

Эти погрешности возникают из-за того, что кроме основных физических величин, предусмотренных принципом действия прибора, в измерительных цепях имеют место дополнительные (вредные) воздействия той же физической природы, что и основные величины.

В электрических цепях источниками погрешности являются следующие.

1. Внутренние шумы элементов электронных схем (шумы приемников оптического излучения ПОИ, сопротивлений, активных элементов: транзисторов, микросхем и т. п.).

2. Паразитные емкостные и индуктивные связи.

3. Сопротивления утечек (например, по поверхности стекла колбы фотоэлемента и т. п.).

4. Паразитные термо-ЭДС, возникающие в точках соединения разнородных проводников.

5. В ОЭП иногда следует так же учитывать фотонный шум.

Если прибор содержит механическую подвижную систему, то источником вредных воздействий являются все дополнительные силы и моменты сил, отсутствие которых не нарушает принципа действия прибора.

К числу вредных сил и моментов сил относятся:

силы и моменты трения в опорах, направляющих и шарнирных соединениях подвижной системы;

силы и моменты сил от неуравновешенности подвижной системы;

силы и моменты сил от взаимодействия подвижной системы с внутренними магнитными и электрическими полями прибора;

гидростатические, гидродинамические и аэродинамические силы и моменты сил.

$$\Delta y_{mc} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{df_0}{dq_i} \right) \Delta q_i \quad (0.48)$$

### Дополнительная погрешность

*Дополнительная погрешность средства измерений*  $\Delta u_{доп}$  - составляющая погрешности, дополнительно возникающая вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от номинального её значения или выхода за пределы нормальной области значений.

К числу влияющих величин в первую очередь следует отнести климатические (температуру, влажность, давление); механические (наклоны, линейные и угловые ускорения); электрические, магнитные, радиационные величины.

Отклонение влияющих величин  $\xi'_k$  от номинальных значений  $\xi'_{0k}$  приводит к изменению внутренних параметров  $q_i$  и внутренних вредных воздействий или к появлению новых вредных воздействий.

Погрешность, возникающая под влиянием только одной влияющей величины, называют *частной дополнительной погрешностью*. Погрешность можно определить теоретически и экспериментально.

При экспериментальном определении дополнительных погрешностей испытательное оборудование, в большинстве своем, позволяет изменять



только одну величину, но существуют и комплексные испытательные установки.

Суммарная дополнительная погрешность возникает при одновременном изменении всех влияющих величин, соответствующих реальным условиям эксплуатации. Суммарная дополнительная погрешность носит случайный характер, как вследствие случайного изменения влияющих величин, так и вследствие случайного характера изменения внутренних параметров.

При отклонении влияющих величин от номинальных значений параметр  $q_i$  прибора изменяется на величину

$$\Delta q_i = \sum_{k=1}^l \left( \frac{dq_i}{d\xi'_k} \right)_0 \Delta \xi'_k \quad (0.49)$$

где  $\Delta \xi'_k$  - отклонение влияющей величины от номинального значения ( $\Delta \xi'_k = \xi'_k - \xi'_{k0}$ )

Погрешность от влияния всех влияющих величин на параметры прибора

$$\Delta y_{\text{доп}} = \sum_{i=1}^n \left\{ \left( \frac{df_0}{dq_i} \right) \left[ \sum_{k=1}^l \left( \frac{dq_i}{d\xi'_k} \right)_0 \Delta \xi'_k \right] \right\} \quad (0.50)$$

Функцией влияния  $\Psi(\xi)$  называется зависимость изменения метрологических характеристик средства измерений от изменения влияющей величины  $\xi_k$  или от изменения совокупности влияющих величин

$$\Delta y_{\text{доп}} = \Psi(\xi_k) \quad (0.51)$$

В результате статическая погрешность прибора

$$\Delta y_{\Sigma} = \Delta y_{\text{м}} + \Delta y_{\text{и}} = \Delta y_{\text{м}} + \Delta y_{\text{ио}} + \Delta y_{\text{и доп}} = \Delta y_{\text{м}} + \Delta y_{\text{пр}} + \Delta y_{\text{пт}} + \Delta y_{\text{мс}} + \Delta y_{\text{и доп}}, \quad (0.52)$$

где  $\Delta y_{\text{м}}$  - методическая погрешность,  $\Delta y_{\text{и}}$  - инструментальная погрешность,  $\Delta y_{\text{ио}}$  и  $\Delta y_{\text{и доп}}$  - основная и дополнительная составляющие инструментальной погрешности,  $\Delta y_{\text{пт}}$  - производственно-технологическая погрешность,  $\Delta y_{\text{мс}}$  - материально-структурная погрешность,  $\Delta y_{\text{пр}}$  - погрешность приближения.

### **Выделение аддитивных, мультипликативных и степенных компонентов.**

Погрешность приближения зависит от величины входного сигнала  $x$  и её выражение можно разложить в ряд Маклорена по степеням  $x$ :

$$\Delta y_{\text{пр}} = a_0 + b_0 x + c_0 x^2 + \dots \quad (0.53)$$

Аналогично можно разложить составляющие производственно-технологической погрешности

$$\Delta y_{\text{ит}} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{df_0}{dq_i} \right) \Delta q_i = \sum_{i=1}^n A_i(x) \Delta q_i, \quad (0.54)$$

где  $A_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + \dots$

Составляющие дополнительной погрешности

$$\begin{aligned} \Delta y_{\text{доп}} &= \sum_{i=1}^n \frac{df_0}{dq_i} \sum_{k=1}^1 \frac{dq_i}{d\xi_k} \Delta \xi_k = \sum_{i=1}^n \left\{ A_i(x) \sum_{k=1}^1 [B_{ik}(x) \Delta \xi_k] \right\} = \\ &= B_{ik}(x) = a_{ik} + b_{ik} x + c_{ik} x^2 + \dots \end{aligned} \quad (0.55)$$

## 1.12 Составление уравнения погрешностей измерительных цепей

Для составления уравнения погрешностей измерительной цепи, т.е. уравнения общей погрешности прибора, подвергается анализу структурная схема прибора. При этом предварительно для каждого звена входящего в структурную схему прибора составлены и нормированные уравнения погрешностей, приведенные к виду.

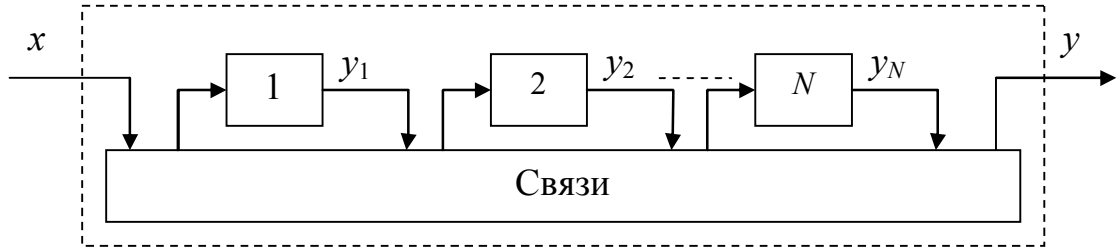
Рассмотрим измерительную цепь, состоящую из  $N$  звеньев, каждое из которых имеет погрешность  $\Delta y_i$ , а общая абсолютная погрешность равна  $\Delta y$  (рис. 0.6).

При постоянном входном сигнале  $x$ , выходной сигнал  $y$  получает приращение  $\Delta y$  вследствие приращений промежуточных сигналов  $y_i$  на величину  $\Delta y_i$ .

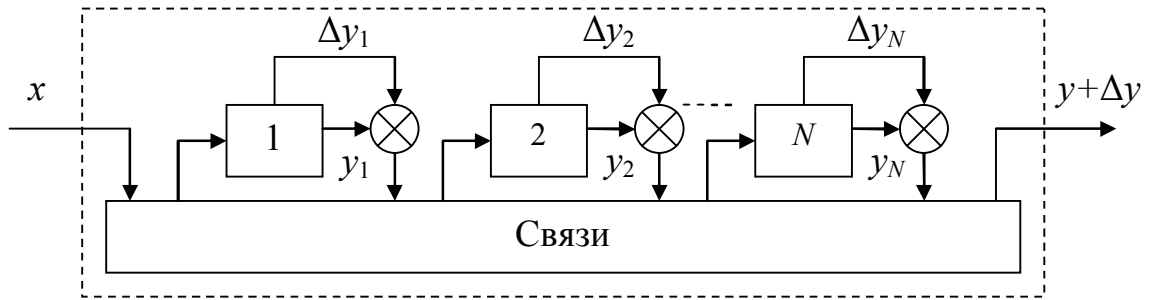
В линейном приближении можно представить при  $x = \text{const}$

$$\Delta y = \sum_{i=1}^N \left( \frac{dy}{dy_i} \right)_0 \Delta y_i, \quad (0.56)$$

где  $\left( \frac{dy}{dy_i} \right)$  – коэффициент влияния  $i$ -го звена на общую погрешность.



а) При отсутствии погрешностей



б) При наличии погрешностей

Рисунок 0.6 – Измерительная цепь

В безразмерной форме

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{dy}{dy_i} \right)_0 \frac{y_i}{y} = \frac{\Delta y_i}{y_i}, \quad (0.57)$$

где  $\frac{\Delta y_i}{y_i}$  – относительная погрешность  $i$ -го звена,  $\frac{\Delta y}{y}$  – относительная погрешность цепи.

Или

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^N \Psi \frac{\Delta y_i}{y_i}, \quad (0.58)$$

где  $\Psi_i = \left( \frac{dy}{dy_i} \right)_0 \frac{y_i}{y}$  – безразмерный коэффициент влияния  $i$ -го звена.

Для определения коэффициента влияния  $\Psi_i$  предположим, что все звенья, кроме  $i$ -го не имеют погрешностей, тогда с учетом  $dy/y = dS/S$  и  $dy_i/y_i = dS_i/S_i$  получим

$$\Psi_i = \left( \frac{dS}{dS_i} \right) \frac{S_i}{S} \quad (0.59)$$

Если вместо  $y$  и  $y_i$  подставить абсолютные величины диапазонов изменения этих сигналов  $\bar{y}$  и  $\bar{y}_i$ , то получим

$$\zeta = \sum_{i=1}^N \Psi_i \zeta_i \quad (0.60)$$

где  $\zeta$  - приведенная относительная погрешность прибора;  $\zeta_i$  - приведённая относительная погрешность  $i$ -го звена.

Применим эти формулы для определения коэффициентов влияния различных цепей.

#### А. Последовательное соединение элементов

Чувствительность такой измерительной цепи согласно (0.59)

$$S = S_1 S_2 \dots S_N = \prod_{i=1}^N S_i \quad (0.61)$$

откуда

$$\frac{dS}{dS_i} = \frac{1}{S_i} \prod_{i=1}^N S_i \quad (0.62)$$

Подставляя (0.61) и (0.62) в (0.59) получим

$$\Psi_i = 1$$

Следовательно, при последовательном соединении элементов, относительная погрешность любого элемента приводится к выходу "один к одному", а суммарная погрешность прибора равна сумме погрешностей звеньев.

$$\zeta = \sum_{i=1}^N \zeta_i \quad (0.63)$$

Типичным примером такого последовательного соединения является цепь, состоящая из источника излучения, оптической системы, приемника оптического излучения, усилителя (рис. 0.7).

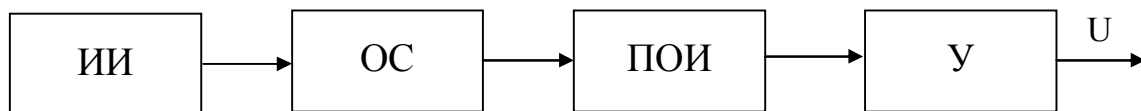


Рисунок 0.7 – Цепь с последовательным соединением

Относительные изменения мощности источника ( $\Delta\Phi/\Phi$ ), коэффициента пропускания оптической системы и среды распространения ( $\Delta\tau/\tau$ ), чувствительности ПОИ, коэффициента усиления ( $\Delta k/k$ ) такой измерительной цепи складываются

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta\Phi}{\Phi} + \frac{\Delta\tau}{\tau} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta k}{k} \quad (0.64)$$

#### Б. Параллельное соединение элементов

Чувствительность такой измерительной цепи (0.21) имеет вид

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_N = \sum_{i=1}^N S_i \quad (0.65)$$

откуда

$$\frac{dS}{dS_i} = 1 \quad (0.66)$$

Подставим (0.65) и (0.66) в (0.59), получим

$$\Psi_i = \frac{S_i}{S} = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (0.67)$$

Следовательно, при параллельном соединении элементов  $\Psi_i \leq 1$ .

Суммарная относительная погрешность такой цепи

$$\zeta = \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{S} \zeta_i \quad (0.68)$$

### В. Параллельно-встречное соединение элементов

Чувствительность такой измерительной цепи

$$S = \frac{S_1}{1 - (\pm S_1 S_2)} \quad (0.69)$$

где верхний знак "+" соответствует положительной обратной связи, а нижний "-" соответствует отрицательной обратной связи

Определим частные производные

$$\frac{dS}{dS_1} = \frac{1}{1 - (\pm S_1 S_2)^2}, \quad \frac{dS}{dS_2} = \frac{\pm S_1^2}{1 - (\pm S_1 S_2)^2}. \quad (0.70)$$

Подставляя (0.69) и (0.70) в (0.59), получим коэффициент влияния звеньев прямой и обратной цепи.

$$\Psi_1 = \frac{1}{1 - (\pm S_1 S_2)}, \quad \Psi_2 = \frac{\pm S_1 S_2}{1 - (\pm S_1 S_2)}. \quad (0.71)$$

Суммарная относительная погрешность

$$\zeta = \frac{\zeta_1}{1 - (\pm S_1 S_2)} + \frac{\pm S_1 S_2 \zeta_2}{1 - (\pm S_1 S_2)} \quad (0.72)$$

При отрицательной обратной связи

$$\zeta = \frac{1}{1 + S_1 S_2} - \frac{S_1 S_2 \zeta_2}{1 + S_1 S_2} = \frac{\zeta_1 - S_1 S_2 \zeta_2}{1 + S_1 S_2} \quad (76)$$

Отсюда следует, что чем больше глубина уравнивания  $S_1 S_2$ , тем меньше погрешность прямой цепи влияет на общую погрешность прибора.

Поскольку глубина уравнивания  $S_1 S_2$  практически не влияет на погрешность цепи обратной связи  $S_2$ , то эту цепь следует выбирать с малой погрешностью.

В случае компенсационного метода измерений (отрицательная обратная связь с  $S_2 = \infty$ ) получаем, что  $\Psi_1 = 0$ ,  $\Psi = -1$ , а

$$\zeta = \zeta_2$$

т.е. относительная погрешность прибора равна относительной погрешности компенсации.

### **1.13 Виды точностных расчетов. Методы суммирования погрешностей**

Существует два вида точностных расчетов:

1. Проверочный расчет, при котором для измерительного прибора с известной схемой назначают допуски на все первичные погрешности и определяют суммарную погрешность функционирования прибора.

2. Проектный расчет, при котором по заданной в ТЗ погрешности назначают требования к точности изготовления деталей, элементов, узлов, а также решают задачу оптимизации структуры средства измерения.

При проектировании измерительных ОЭПиС выполняется проектный расчет, а в более широком смысле следует говорить о синтезе ОЭПиС. Проектные расчеты рассматриваются в курсах "Конструирование ОЭПиС" и "Проектирование ОЭПиС".

В настоящем курсе рассматриваются различные схемы измерительных ОЭПиС и осуществляется их анализ, то есть выполняется проверочный расчет схем измерительных ОЭПиС.

В настоящее время в связи с использованием в составе измерительных ОЭПиС средств вычислительной техники, в том числе микропроцессоров, все чаще используется точностная калибровка ОЭПиС, включающая заблаговременное (например, на стадии испытания прибора) определение функций влияния различных факторов (температуры, фоновой засветки и т. д.) и ввод соответствующих поправок в функцию преобразования непосредственно в процессе работы прибора в соответствии с условиями этой работы, в том числе по сигналам соответствующих датчиков (температуры, фона и т. д.).

Это позволяет уменьшить влияние систематических составляющих погрешности.

Проверочный расчет начинается с определения первичных погрешностей и влияющих факторов, а далее переходят к суммированию полученных значений  $\Delta q_i$  и  $\Delta \xi_k$  с их коэффициентами влияния в соответствии с принятой моделью инструментальной погрешности  $\Delta u_n$ .

Наибольшее распространение на практике получили два метода суммирования отдельных составляющих общей инструментальной погрешности.

1. Метод максимума-минимума предполагает сложение предельных (максимальных и минимальных) величин частичных погрешностей.

При первом методе за модель  $\Delta y_{и}$  принимается сумма слагаемых

$$\Delta y_{и} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{dy}{dq_i} \right)_0 \Delta q_i + \sum_{k=1}^l \left( \frac{dy}{d\xi_k} \right)_0 \Delta \xi_k \quad (0.73)$$

т. е погрешностям  $\Delta q_i$  и  $\Delta \xi_k$  присваиваются предельные значения допусков и отклонений, полученные на предыдущих этапах и они алгебраически суммируются. Погрешности  $\Delta q_i$  и  $\Delta \xi_k$  могут быть как случайными, так и систематическими. Этот метод при большом числе параметров дает неудовлетворительный результат, так как расчет дает увеличение абсолютной погрешности пропорциональное числу параметров.

2. Вероятностный метод основан на применении статической обработке результатов при суммировании первичных погрешностей, являющихся случайными величинами.

При выборе второго, вероятностного, метода влияние систематических составляющих учитывается путем их алгебраического суммирования, а влияние случайных составляющих учитывается путем суммирования их дисперсий с учетом коэффициентов влияния и коэффициентов, определяемых видом распределения отдельных компонент.

Результирующая погрешность при этом может быть представлена как сумма

$$\Delta y_{и} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{dy}{dq_i} \right)_0^2 K_{qi} \sigma_{qi}^2 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{dy}{dq_i} \right)_0 C_{qi} \Delta q_{si}}, \quad (0.74)$$

где  $\sigma_{qi}^2$  - дисперсия  $i$ -той случайной составляющей;  $K_{qi}$  - коэффициенты учитывающие вид рассеяния случайных первичных погрешностей;  $\Delta q_{si}$  - значение  $i$ -той систематической составляющей;  $C_{qi}$  - коэффициент учитывающий вид закона распределения и смещения центров распределения относительно нулевого значения.

Здесь не выделены отдельно основные и дополнительные погрешности, а составляющие погрешностей считаются независимыми и линейно суммируемыми.

Коэффициенты принимают значения:

$K_q=1$  для Гауссова распределения, совпадающего с полем допуска,

$K_q=1,73$  для равномерного распределения по полю допуска,

$K_q=1,22$  для распределения по закону Симпсона (треугольному),

$K_q=1,14$  для распределения по закону Релея.

## 1.14 Нормируемые метрологические характеристики средств измерений

Нормируемые метрологические характеристики (НМХ) средств измерений устанавливаются ГОСТ 8.009-84.

Они являются составной частью исходной информации

1) для определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений;

2) для расчета МХ каналов измерительных систем состоящих из средств измерений с нормированными МХ;

3) для оптимального выбора средств измерений;

4) для использования в качестве контролируемых характеристик при контроле средств измерений на соответствие нормам.

В НТД на средства измерений конкретных видов или типов следует нормировать комплексы МХ из числа установленных стандартом.

ГОСТ 8.009-84 устанавливает следующую модель инструментальной составляющей погрешности измерений.

$$\Delta_{instr} = \Delta_{MI} * \Delta_{int}, \quad (0.75)$$

где символом \* обозначено объединение погрешности  $\Delta_{MI}$  средства измерений в реальных условиях применения и составляющей погрешности  $\Delta_{int}$ , обусловленной взаимодействием средства измерений с объектом измерений.

Под объединением понимают применение к составляющим погрешности измерений некоторого функционала, позволяющего рассчитать погрешность, обусловленную совместным воздействием этих составляющих.

Функционал \* может описывать, например простое арифметическое или квадратическое сложение.

Комплекс НМХ средств, измерений конкретного типа устанавливают на основании принятой для средств измерений данного типа модели его погрешности в реальных условиях применения.

ГОСТ 8.009-84 устанавливает, что модель погрешности средств измерений определенного типа в реальных условиях применения может иметь один из трех видов

### **Модель I**

$$(\Delta_{MI})_1 = \Delta_{OS} * \overset{o}{\Delta}_O * \overset{o}{\Delta}_{OH} * \sum_{i=1}^l \Delta_{ci} * \Delta_{dyn}. \quad (0.76)$$

Здесь знак \* обозначает объединение пяти составляющих погрешности средства измерений в реальных условиях их применения.  $\Delta_{OS}$  – систематическая составляющая основной погрешности средства измерений;  $\Delta_O$  – случайная составляющая основной погрешности средства измерений;  $\Delta_{OH}$  – случайная составляющая основной погрешности,



обусловленная гистерезисом;  $\Delta_{dyn}$  – динамическая погрешность средств измерений, обусловленная влиянием скорости (частоты) изменения входного сигнала средства измерений;  $\sum_{i=1}^l \Delta_{ci}$  – объединение дополнительных погрешностей  $\Delta_{ci}$  средства измерений, обусловленных действием влияющих величин неинформативных параметров входного сигнала (где  $l$  – число дополнительных погрешностей).

Систематическую составляющую основной погрешности  $\Delta_{OS}$  рассматривают как детерминированную величину для отдельного экземпляра средства измерений, но как случайную величину (процесс) на совокупности средств измерений данного типа. Составляющие  $\Delta_{ci}$  и  $\Delta_{dyn}$  можно рассматривать как детерминированные величины или как случайные величины (процессы) в зависимости от того, какие известны характеристики реальных условий применения средства измерений и спектральные характеристики входного сигнала средства измерений.

### **Модель II**

$$(\Delta_{Mi})_2 = \overset{o}{\Delta}_O * \sum_{i=1}^l \Delta_{ci} * \Delta_{dyn}. \quad (0.77)$$

Здесь символически объединены три составляющие погрешности средства измерений в реальных условиях применения.  $\Delta_O$  – основная погрешность средства измерений (без разделения ее на составляющие как в модели I); которую определяют по формуле:

$$\Delta_O = \Delta_{OS} + \overset{o}{\Delta}_{OH}. \quad (0.78)$$

Модель II применима только для средств измерений таких типов, у которых случайная составляющая основной погрешности ( $\Delta_O$ ) может считаться не существенной (пренебрежимо малой).

Если составляющие  $\sum_{i=1}^l \Delta_{ci}$  и  $\Delta_{dyn}$  настолько малы, что их можно не учитывать, т.е.  $(\Delta_{Mi})_2 = \Delta_O$ , то модель II может быть применена и при наличии существенной случайной составляющей основной погрешности.

Установление комплекса НМХ для средств измерений данного типа следует начинать с выбора модели погрешности средства измерений. При этом следует учитывать полную совокупность факторов (технических, экономических, возможность катастрофических последствий, угрозу для здоровья людей, ответственность решений, принимаемых по результатам измерений и т. п.).

Если ни в коем случае нельзя допускать, чтобы погрешность измерений хотя бы изредка превышала значение, рассчитанное по НМХ, допускаются только такие средства измерений, случайная составляющая основной погрешности которых пренебрежимо мала.

При нормировании комплекса МХ таких средств измерений должна быть выбрана модель II их погрешности, т. е. комплекс НМХ должен состоять из НМХ 2<sup>й</sup> группы. При этом можно рассчитать такие интервалы погрешности, в которых погрешность находится с вероятностью равной единице.

Модель II погрешности выбирается и для тех средств измерений, при применении которых в реальных условиях число таких составляющих их погрешности, которые должны быть введены в расчет по отдельности, мало (до трех), и случайная составляющая основной погрешности которых пренебрежимо мала; инструментальная составляющая погрешности измерений может быть принята равной основной погрешности средства измерений, т. е. необходимость в объединении различных составляющих инструментальной составляющей погрешности измерений отсутствует.

В данном случае рассчитанный интервал погрешности будет представлять собой грубую оценку сверху искомой инструментальной составляющей погрешности измерений, охватывающую все возможные, в том числе весьма редко реализующиеся, значения погрешностей. Практически это приводит к существенному завышенным требованиям к МХ средств измерений при заданной требуемой точности измерений.

При нормировании МХ 2<sup>й</sup> группы, (т. е. когда за основу берут модель II), метод расчета должен заключаться в арифметическом суммировании модулей наибольших возможных значений всех существенных составляющих инструментальной составляющей погрешности измерений. Эти наибольшие возможные значения представляют собой границы интервалов, в которых соответствующие составляющие находятся с вероятностью равной единице.

Если при применении средств измерений данного типа допускается, чтобы погрешность измерений изредка превышала значение, рассчитанное по НМХ средства измерений, то должна быть выбрана модель I погрешности средства измерений, т. е. комплекс НМХ должен состоять из МХ 1<sup>й</sup> группы. При этом комплексу НМХ можно рассчитывать точечные и интервальные характеристики, установленные ГОСТ 8.011-72 - интервалы, в которых инструментальная составляющая погрешности измерений находится с любой заданной вероятностью, близкой к единице, но меньше ее.

Приближая значения вероятности (при расчете инструментальной составляющей погрешности измерений) к единице (но не принимая ее равной единице), можно получить оценки инструментальной составляющей погрешности измерений, достаточно достоверные в тех задачах, для решения которых проводят измерения.

При нормировании МХ 1<sup>й</sup> группы, т. е. когда за основу берут модель I погрешности средств измерений, метод расчета должен заключаться в статическом объединении характеристик всех существенных

составляющих модели I и составляющей  $\Delta_{int}$ , обусловленной взаимодействием средства измерений с объектом измерений.

### 1.15 Критерий рациональных комплексов НМХ средств измерений

Рациональный комплекс НМХ средств измерений должен включать в себя МХ той группы (1<sup>й</sup> или 2<sup>й</sup>), которая соответствует назначению и свойствам средств измерений данного типа.

Рациональный комплекс НМХ средств измерений должен включать характеристики всех составляющих модели I или II существенных для средств измерений данного типа.

Критерий существенности различных составляющих погрешности средств измерений.

1. Систематическую составляющую  $\Delta_{os}$  основной погрешности (если принята модель I) принимают существенной во всех случаях. Ее характеристики следует нормировать для средств измерений всех типов.

2. Случайную составляющую основной погрешности аналоговых средств измерений и ЦАП принимают существенной при одновременном выполнении двух неравенств:

$$\frac{\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_o]}{H_o} \geq 0,9 \quad \text{и} \quad \frac{\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_o]}{\Delta_{os}} \geq 0,1 \quad (0.79)$$

или

$$0,1 \leq \frac{\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_o]}{H_o} < 0,9 \quad \text{и} \quad \frac{\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_o]}{\Delta_{os}} \geq \frac{1}{\sqrt{100 + 8,3 \left( \frac{H_o}{\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_o]} \right)^2}}, \quad (0.80)$$

где  $\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_o]$  - среднее квадратическое отклонение случайной составляющей основной погрешности средства измерений;  $H_o$  - основание закона распределения случайной составляющей основной погрешности средств измерений, от гистерезиса - вариация при нормальных условиях;  $\Delta_{os}$  - предел допускаемой систематической составляющей основной погрешности.

Если группы неравенств (0.79) и (0.80) не выполняются, то случайную составляющую основной погрешности средства измерений считают несущественной (пренебрежимо малой).

3. Случайную составляющую основной погрешности аналоговых средств измерений и ЦАП, обусловленную гистерезисом, принимают существенной при одновременном выполнении двух неравенств:

$$0,1 \leq \frac{\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_O]}{H_O} < 0,9 \quad \text{и} \quad \frac{\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_O]}{\Delta_{OSp}} \geq \frac{1}{\sqrt{100 + 8,3 \left( \frac{H_O}{\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_O]} \right)^2}}, \quad (0.81)$$

или

$$\frac{\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_O]}{H_O} < 0,1 \quad \text{и} \quad \frac{H_O}{\Delta_{OSp}} \geq 0,3 \quad (0.82)$$

Если группы неравенств (100) и (101) не выполняются, то случайную составляющую основной погрешности средств измерений, обусловленную гистерезисом, считают несущественной (пренебрежимо малой).

4. Условие существенности вариации  $H_O$  при нормировании характеристик основной погрешности аналоговых средств измерений и ЦАП в целом (без разделения ее на составляющие - модель II) следующие:

$$\frac{H_O}{\Delta_{OS_{max}}} \geq 0,4, \quad (0.83)$$

где  $\Delta_{OS_{max}}$  - наибольшее, возможное значение систематической составляющей основной погрешности средств измерений данного типа.

5. Для ЦИП и АЦП во всех случаях принимают существенной номинальную ступень квантования  $q_{sf}$  (номинальная цена единицы наименьшего разряда кода  $\mu_{sf}$ ). Номинальную ступень квантования определяют по формуле

$$q_{sf} = \frac{x_B - x_H}{M}, \quad (0.84)$$

где  $x_B$  и  $x_H$  - верхний и нижний пределы диапазона измерений;  $M$  - число возможных выходных кодов (показаний) на данном диапазоне.

При двоичном выходном коде  $q_{sf} = \mu_{sf}$ . При десятичном отсчетном устройстве ЦИП  $q_{sf} = k\mu_{sf}$  где  $k$  - целое число (например, отсчет через 5 единиц: 0, 5, 10, ...).

6. Если принята модель I основной погрешности, то случайную составляющую основной погрешности ЦИП и АЦП, обусловленную гистерезисом считают существенной при выполнении неравенства

$$\frac{H_O}{q_{sf}} > 0,3. \quad (0.85)$$

7. Если принята модель I основной погрешности, то случайную составляющую ЦИП и АЦП считают существенной при выполнении неравенства

$$\sigma[\overset{\circ}{\Delta}_O] > 0,1 \sqrt{H_O^2 + q_{sf}^2}. \quad (0.86)$$

8. Если принята модель II основной погрешности, то вариацию  $H_O$  при нормировании характеристик основной погрешности ЦИП и АЦП в целом

(без разделения ее на составляющие) считают существенной при выполнении неравенства

$$\frac{H_o}{q_{sf}} > 0,2. \quad (0.87)$$

9.Дополнительные погрешности принимают существенными при соблюдении неравенства

$$\sum_{i=1}^l \left| \Delta_{C_{i \max}} \right| \geq 0,17 \Delta_{MI \max}. \quad (0.88)$$

где  $\Delta_{C_{i \max}}$  - наибольшее возможное значение  $i$ -ой дополнительной погрешности в рабочих условиях применения средства измерений данного типа;  $\Delta_{MI \max}$  - наибольшее возможное значение погрешности средства измерений в рабочих условиях применения средства измерений данного типа.

Если неравенство (0.88) не выполняется, то все дополнительные погрешности средства измерений считают несущественными.

10.Динамические погрешности принимают существенными при удовлетворении неравенства

$$\Delta_{dyn \max} \geq 0,17 \Delta_{MI \max}. \quad (0.89)$$

где  $\Delta_{dyn \max}$  - наибольшее возможное значение динамической погрешности средств измерений в рабочих условиях.

ГОСТ 8.009-84 устанавливает комплексы НМХ средств измерений отдельно для следующих функциональных групп средств измерений:

ЦАП, меры, в том числе многозначные меры; аналоговые и цифровые измерительные и регистрирующие приборы; аналоговые и аналого-цифровые измерительные преобразователи, в том числе измерительные коммутаторы сигналов.

### **1.16 Определение статистических характеристик погрешности средств измерений**

Алгоритмы обработки экспериментальных данных при контроле и аттестации (поверке) средств измерений основаны на следующих выражениях оценок статистических характеристик.

Как правило, оценку погрешности производят для ряда  $x_j$  точек диапазона измерений.

Для точки  $x_j$  производят ряд отсчетов общим числом  $2n$ , при этом экспериментально устанавливают заданное входное воздействие  $x_j$  изменяя информативный параметр входного (или выходного для меры) сигнала со стороны меньших  $x_j$  и больших  $x_j$  значений до значения  $x_j$ .

Реализации погрешностей  $\Delta'_i = x'_{ji} - x_{ji}$  и  $\Delta''_i = x''_j - x_j$

в каждой из  $j$  точек диапазона, полученные  $n$  раз при изменении со стороны меньших значений и  $n$  раз со стороны больших значений, вносят в

соответствующую таблицу, и используют для дальнейшей математической обработки.

Среднее значение погрешности в точке  $x_j$  диапазона измерений, полученные экспериментально при медленных непрерывных изменениях информативного параметра входного (или выходного для меры) сигнала со стороны меньших (для  $\bar{\Delta}'$ ) и (для  $\bar{\Delta}''$ ) значений определяют по формулам

$$\bar{\Delta}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta'_i \quad (0.90)$$

$$\bar{\Delta}'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta''_i$$

Число реализаций  $n$  должно быть настолько большим, чтобы разности

$\bar{\Delta}' - M(\Delta')$  и  $\bar{\Delta}'' - M(\Delta'')$ , где  $M(\Delta)$  - математическое ожидание случайной величины, не превышали наибольшего допустимого значения, установленного в НТД на методы испытаний и (или) методы поверки средств измерений данного типа.

Оценка  $\tilde{\Delta}_{SH}$  систематической составляющей  $\Delta_S$  погрешности конкретного экземпляра средства измерений, обладающего вариацией, в точке  $x_j$  диапазона измерений определена формулой

$$\tilde{\Delta}_{SH} = \frac{\bar{\Delta}' + \bar{\Delta}''}{2}. \quad (0.91)$$

Если вариацию можно не учитывать или она отсутствует, то

$$\tilde{\Delta}_S = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} \Delta_i, \quad (0.92)$$

где  $2n$  - число опытов при определении,  $\tilde{\Delta}_S$  которое должно быть достаточно большим, чтобы  $\tilde{\Delta}_S$  была достаточно близка к математическому ожиданию случайной величины  $\Delta$ .

Оценка  $\tilde{H}$  вариации должна быть определена как абсолютное значение разности между  $\bar{\Delta}'$  и  $\bar{\Delta}''$ :

$$\tilde{H} = \left| \bar{\Delta}' - \bar{\Delta}'' \right|. \quad (0.93)$$

Оценка  $\tilde{\sigma} \left[ \begin{smallmatrix} o \\ \Delta_H \end{smallmatrix} \right]$  среднего квадратического отклонения случайной составляющей погрешности конкретного экземпляра средства измерений, обладающего вариацией,

$$\tilde{\sigma}\left[\overset{o}{\Delta}_H\right] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta'_i - \bar{\Delta}')^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta''_i - \bar{\Delta}'')^2}{2n-1}}. \quad (0.94)$$

Если вариацию не учитывают или она отсутствует, то

$$\tilde{\sigma}\left[\overset{o}{\Delta}_H\right] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{2n} (\Delta_i - \tilde{\Delta}_S)^2}{2n-1}}. \quad (0.95)$$

Число  $n$  устанавливают таким, чтобы оценка,  $\tilde{\sigma}[\overset{o}{\Delta}]$  полученная при  $2n$  реализациях погрешности, отличалась от значения  $\tilde{\sigma}[\overset{o}{\Delta}]$ , полученного при  $2n \rightarrow \infty$  реализациях, не более чем на заданное значение, указываемое в НТД на методы испытаний и (или) методики поверки средств измерений данного типа.

Оценка  $\tilde{M}[\Delta_S]$  математического ожидания систематической составляющей погрешности средств измерений какого-либо типа

$$\tilde{M}[\Delta_S] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{\Delta}_{Si}, \quad (0.96)$$

где  $m$  - число средств измерений, используемых при оценке  $\tilde{M}[\Delta_S]$ , и  $\tilde{\Delta}_{Si}$  - значение  $\Delta_S$  для  $i$ -го экземпляра средств измерений.

Если для множества средств измерений данного типа систематическая составляющая погрешности рассматривается как случайная величина, то оценка  $\tilde{\sigma}[\Delta_S]$  ее среднего квадратического отклонения определяется как

$$\tilde{\sigma}[\Delta_S] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\tilde{\Delta}_{Si} - M[\Delta_S])^2}{m-1}}. \quad (0.97)$$

## Литература

1. Муханин Л.Г. Схемотехника измерительных устройств. СПб, Лань, 2009.
2. Орнатский П.П. Автоматические измерительные приборы аналоговые и цифровые — К., 1965
3. Юдин М.Ф. и др. Основные термины в области метрологии. Словарь-справочник — М.: Изд. стандартов, 1989
4. Никитин В.А., Бойко С.В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: Учебное пособие - 2-е изд. перераб. и доп. - Оренбург ГОУ ОГУ, 2004. - 462 с
5. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. Учебное пособие. СПб, Политехника, 2007.
7. Опτικο-электронные приборы для научных исследований: Учеб. Пособие / Л.А. Новицкий, А.С. Гоменюк, В.Е. Зубарев, А.М. Хорохоров. – М.Машиностроение, 1986. – 432с., ил.
8. Федеральный закон Российской Федерации от 26 июня 2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
9. Федеральный закон Российской Федерации от 10 июня 1993 года № 5154-1 «О стандартизации».
10. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании».
11. РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
12. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
13. ГОСТ Р 1.0-92 Государственная система стандартизации Российской Федерации. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1992.
14. ГОСТ Р 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.
15. ГОСТ 8.395. ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. - М.: Изд-во стандартов.
16. ГОСТ 8.513. ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения. - М.: Изд-во стандартов.
17. ГОСТ 8.401. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.
18. ГОСТ 8.117-81. ГСИ. Единицы физических величин.
19. МИ 2277-94 ГСИ. Система сертификации средств измерений. Основные положения и порядок проведения работ.
20. ПР 50.2.006-94 ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения.
21. ПР 50.2.009-94 ГСИ. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерения.



**Валерий Викторович Кортаев**

**ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

**Учебное пособие**