

УДК 620.1.08

**СТАТИЧЕСКАЯ ГРАДУИРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ****Кашуба Леонид Анатольевич<sup>1</sup>, Мороз Владимир Владимирович<sup>2</sup>,  
Волков Алексей Алексеевич<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Кандидат технических наук, доцент Института системного анализа и управления;  
ГБОУ ВПО «Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: leonid-ak@mail.ru.

<sup>2</sup>Старший преподаватель Института системного анализа и управления;  
ГБОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: moroz@uni-dubna.ru.

<sup>3</sup>Начальник технологического бюро №4 отдела 128 РКЗ ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева;  
ФГУП ГКНПЦ им. М.В. Хруничева;  
121087, Москва, Новозаводская улица, дом 18;  
e-mail: volkov1811@gmail.com.

В работе в стандартизованных терминах метрологии представлено описание способа статической градуировки измерительных каналов рабочих средств измерений, обеспечивающих определение метрологических характеристик и погрешностей при однократных измерениях по осреднённым градуировочным характеристикам множества измерений, проводимых в межповерочный период или в приемлемый период времени после поверки со значениями соответствующими доверительной вероятности и статистической надёжности, полученными при градуировке.

**Ключевые слова:** средства измерения, измерительный канал, функция преобразования средства измерения, поверка, градуировка, погрешность измерения, доверительная вероятность, статистическая надёжность, дифференциальная функция распределения вероятностей.

**STATIC CALIBRATION OF MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS****Kashuba Leonid<sup>1</sup>, Moroz Vladimir<sup>2</sup>, Volkov Alexei<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Candidate of Science in Engineering, associate professor of Institute of system analysis and management;  
Dubna International University of Nature, Society and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: leonid-ak@mail.ru.

<sup>2</sup>Senior teacher of Institute of system analysis and management;  
Dubna International University of Nature, Society and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: moroz@uni-dubna.ru.

<sup>3</sup>Chief Of Technology Office Department № 4 128 RKZ FSUE Khrunichev. MV Khrunichev;  
FSUE Khrunichev. MV Khrunichev;  
121087, Moscow, Novozavodskaya street, 18;  
e-mail: volkov1811@gmail.com.

In the work of the standardized terms of Metrology presented a description of how an earth-d calibration of measuring channels of working means of measurement, providing the definition of metrological characteristics and the errors of a single measurement of the average graduated characteristics of many of

*measurements carried out in the inter-calibration period or within a reasonable period of time after verification with the values of the relevant trust ve-of probability and statistical reliability of obtained during calibration.*

**Keywords:** measuring tools, measuring channel, the function of the transformation of the means of measuring, checking, calibration, measurement errors, confidential probability, image-Skye reliability, differential probability distribution function.

## Введение

Машиностроение не может обойтись без хорошо организованной и технически обеспеченной метрологии. К задачам метрологии относятся:

- определение единиц физических величин;
- разработка общей теории измерений;
- разработка принципов, методов и методик измерений, а также технических средств, их реализующих;
- разработка методов установления точности и верности измерений;
- обеспечение целостности измерений.

Юридической основой установления правовых норм метрологии в Российской Федерации является Федеральный закон об обеспечении единства измерений [1]. Он регулирует отношения, возникающие:

- при выполнении измерений;
- установлении и соблюдении требований к измерениям;
- единицам величин;
- эталонам единиц величин;
- стандартным образцам;
- средствам измерений;
- применении стандартных образцов, средств измерений, методик (методов) измерений;
- при осуществлении деятельности по обеспечению единства измерений, предусмотренной законодательством Российской Федерации об обеспечении единства измерений, в том числе при выполнении работ и оказании услуг по обеспечению единства измерений.

Объективная картина мира строится на совокупности терминов. Термины представляют идеализированные свойства исследуемых объектов и процессов формулируют в виде истин, доказанных ранее или не требующих доказательства – *аксиом*. Затем по строгим правилам логического вывода из них выводятся другие истинные свойства (*теоремы*). Эта совокупность умозаключений – *теория* отражает объективно существующие отношения и связи между явлениями объективной реальности.

Термины, отражающие сложившуюся систему основных понятий метрологии, установлены действующими нормативными документами [1, 2, 3, 4].

Основные понятия, используемые в тексте статьи 2 главы 1 закона [1] связаны с правовыми вопросами:

- организационных основ обеспечения единства измерений;
- государственного регулирования в области обеспечения единства измерений;
- обязательной аккредитации органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров) в области обеспечения единства измерений;
- ответственности за нарушение законодательства российской федерации об обеспечении единства измерений;
- финансирования в области обеспечения единства измерений.

Непосредственно с метрологией связаны понятия, посвящённые:

- требованиям к измерениям, единицам величин, эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений;

- созданию федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений;
- поверке и калибровке средств измерений.

По закону [1] (глава 1, статья 1, п. 3) метрология распространяется на измерения, к которым в целях, предусмотренных частью 1 настоящей статьи, установлены обязательные требования и которые выполняются при:

- осуществлении производственного контроля за соблюдением установленных законодательством Российской Федерации требований промышленной безопасности к эксплуатации опасного производственного объекта (п. п. 6);
- выполнении работ по оценке соответствия промышленной продукции и продукции других видов, а также иных объектов установленным законодательством Российской Федерации обязательным требованиям (п. п. 14).

Терминов и понятий, посвящённых метрологии в законе [1] существенно меньше, чем в нормативных документах [2, 3] и [4].

Термины документа [2] применимы в основном для стрелочных (шкальных) приборов и в меньшей степени для средств измерения, используемых при практических измерениях в машиностроении электроизмерительными приборами. Термины документа [3] охватывают более широкий круг понятий, связанных с нормированием точности и верности измерений физических величин аналоговыми и цифровыми средствами измерений.

В нормативных документах [1-3] термины расположены в алфавитном порядке, что неудобно для логичного изложения совокупности представлений о метрологии. В тексте этой работы, сделана попытка изложить её содержание в терминах документов [1-4]. Все определения понятий, соответствующие документу [2], выделены курсивом с указанием номера его позиции в сносках. Определения понятий документов [1, 3, 4] также выделены курсивом. Рядом с определением, даны ссылки на документы в квадратных скобках. В текстовых сносках приведены дополнения к определениям документов [2-4], представленные в наиболее доступном, непрерывно обновляющемся источнике информации в Интернете – свободной энциклопедии «Википедия».

Попытаемся упорядочить и дополнить термины и определения, которые систематизированы в действующих нормативных документах [1, 2, 3, 4], относящихся в основном к *практической (прикладной) метрологии*<sup>2,4</sup>, изложенные применительно к *измерительным приборам*<sup>6,11</sup> и измерительным системам<sup>6,14</sup>.

## 1. Технические измерения в машиностроении

*Объекты измерения*<sup>5,19</sup> в машиностроении обладают множеством разных *свойств*<sup>1</sup>, отличающихся по *величине*<sup>2</sup> и *размеру*<sup>3</sup>. Свойства, дающие представление об объектах, могут быть разделены на две самостоятельные группы:

- *физические свойства*, изучаемые в естественных (физика, химия) и технических науках,
- *нефизические свойства*, присущие общественным (нефизическим) наукам – философии, социологии, экономике и т.д.

---

<sup>1</sup>*Свойство* – философская категория, выражающая такую сторону объекта, которая обуславливает его различие или общность с другими объектами и выявляется в его отношении к ним, сторона проявления *качества*. При этом не всякое свойство *предмета (объекта)* должно рассматриваться при определении *качества*: свойство у предмета может иметься, но при сравнении предмета с другими оно может не быть отличительным или существенным.

<sup>2</sup>*Величина* – одно из основных математических понятий, устанавливающее отношение неравенства: две величины  $a$  и  $b$  одного и того же рода или совпадают ( $a = b$ ), или первая меньше второй ( $a < b$ ), или вторая меньше первой ( $b < a$ ).

<sup>3</sup>*Размер* – числовое значение линейных величин (диаметра, длины, угла и т.п. геометрических параметров) в выбранных единицах измерения.

В рекомендациях [2] физическое свойство объекта (физической системы, явления или процесса) в качественном отношении является общим для многих объектов, но в количественном отношении индивидуальным для каждого из них. Его определяют как *физическую величину*<sup>3.1</sup>. В этом определении смешаны известные понятия *качества*<sup>4</sup> (наименование физического свойства) и *количества*<sup>5</sup> *свойства: (величина и размер)*.

В машиностроении объектами измерения, обладающими физическими свойствами, являются геометрические физические величины: координаты точек поверхностей изделий, по которым вычисляют размеры геометрии поверхностей и тел деталей, сборочных единиц, а также механические и физические свойства материалов, систем, процессов, явлений и т.д., которые характеризуются одной или несколькими *измеряемыми физическими величинами*<sup>3.2</sup>.

Физические свойства объектов машиностроения можно *измерять* и *оценивать*. Нефизические – только *оценивать*.

Измерение физического свойства объекта – совокупность операций в соответствии с *измерительной задачей*<sup>5.18</sup>, по применению технического *средства измерений*<sup>6.2</sup> (СИ), хранящего *единицу измерения физической величины*<sup>4.1</sup>, и обеспечивающего нахождение соотношения (в явном или неявном виде) *измеряемой физической величины*<sup>3.2</sup> с ее единицей и получение *значения физической величины*<sup>3.4</sup>. Приведенное определение понятия «измерение» удовлетворяет общему уравнению измерений, что имеет существенное значение в деле упорядочения системы понятий в метрологии. В нем учтена технологическая сторона (совокупность операций), раскрыта метрологическая суть измерений (сравнение с единицей) и показан гносеологический аспект (получение значения или размера величины). В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не определена единица измерений этой величины) практикуется *оценивание* таких величин по *условным шкалам физических величин*<sup>3.18</sup>.

Измерение физических величин осуществляет большим и разнообразным количеством *средств измерительной техники*<sup>6.1</sup>, основанных на разных *принципах*<sup>7.1</sup>, проводимых разными *методами*<sup>7.2</sup> и выполняемых по утверждённым *методикам выполнения измерений*<sup>7.11</sup>. Измерения физических величин в машиностроении могут быть как *статическими*<sup>5.6</sup> так и *динамическими*<sup>5.7</sup>. Статические измерения могут быть как *однократными*<sup>5.4</sup>, так и *многократными*<sup>5.5</sup>. Динамические измерения могут быть только однократными.

О величине измеряемого свойства объекта измерений при измерении судят по *показанию средства измерений*<sup>6.43</sup> в заданный момент времени. Однако оно ещё не есть *результат измерения физической величины*<sup>8.1</sup>, так как содержит *погрешности результата измерения*<sup>9.1</sup>: *инструментальную*<sup>9.3</sup>, *систематическую*<sup>9.2</sup> и *случайную*<sup>9.8</sup>. Для приближения измеренного *действительного значения физической величины*<sup>3.7</sup> к её *истинному значению*<sup>3.6</sup> необходимо исключить из *отсчёта показания средства измерения*<sup>5.15</sup> систематические погрешности результата измерения. Погрешности результата измерения могут быть представлены как в *абсолютной*<sup>9.9</sup>, так и *относительной*<sup>9.11</sup> форме.

Обеспечению *точности средств измерений*<sup>10.14</sup> в законе [1] посвящена глава 4, связанная с *калибровкой средств измерений*<sup>13.23</sup>, сводящаяся к совокупности операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью *эталоны*<sup>2.1</sup> с целью определения действительных *метрологических характеристик* (МХ)<sup>6.42</sup> этого средства измерений. Определение аналогично *поверке средств измерений*<sup>13.15</sup>, от которой калибровку отличает то, что она распространяется на средства измерений, которые не подлежат *государственному метрологическому контролю*<sup>13.11</sup> и *надзору*<sup>13.12</sup>, т.е. поверке. Калибровка объединяет функции, выполнявшиеся ранее при метрологической аттестации и ведомственной *поверке*<sup>13.15</sup>. Если поверка является обязательной операцией, контролируемой органами Государственной метрологической службы, то калибровка – это добровольная функция, выполняемая либо *метрологической службой*<sup>13.4</sup> предприятия, либо по его заявке любой другой организацией, способной выполнить работу. Калибровке подвергаются *эталоны*<sup>2.1</sup> всех

<sup>4</sup> *Качество* – философская категория, отображающая существенную определенность вещей и явлений реального мира.

<sup>5</sup> *Количество* – категория, выражающая внешнее, формальное взаимоотношение предметов или их частей, а также свойств, связей: их *величину, число*, степень проявления того или иного *свойства*.

разрядов, *меры*<sup>6.10</sup> и средства измерения с *номинальной функции преобразования* [3]. Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средства измерения, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах.

*Основным*<sup>6.4</sup> *рабочим*<sup>6.3</sup> СИ в подавляющем большинстве случаев является электрический *измерительный прибор*<sup>6.11</sup> или *измерительная система ИС* [4]. *Измерительный канал измерительной системы* можно представить схемой *измерительной цепи*<sup>6.24</sup>, которая состоит из:

- чувствительного элемента средства измерения<sup>6.27</sup> или датчика<sup>6.19</sup>, представляющих первичный измерительный преобразователь<sup>6.18</sup> измеряемой физической величины в установленном диапазоне измерений<sup>6.46</sup> преобразующих измеряемую физическую величину<sup>3.2</sup> в электрический измерительный сигнал<sup>5.16</sup>, несущий измерительную информацию<sup>5.17</sup> информативного параметра входного сигнала измерительного преобразователя [3] с влияющей физической величиной<sup>3.9</sup>;
- промежуточных измерительных преобразователей<sup>6.17</sup>, усиливающих и изменяющих электрический сигнал до значений информативного параметра выходного сигнала [3] в установленном диапазоне показаний<sup>6.45</sup> средства измерения<sup>6.2</sup> в форме электрического сигнала, поступающего на регистрирующие<sup>6.31</sup> и показывающие устройства<sup>6.29</sup>, поддающиеся непосредственному восприятию человеком-оператором или передаче последующим автоматизированным<sup>6.9</sup> или автоматическим<sup>6.8</sup> техническим системам для выработки команд управления.

Регистрирующие устройства имеют множество конструктивных исполнений. Могут быть запоминающими, записывающими результат измерения в виде графика, либо печатающими. В зависимости от формы выходного сигнала аналогового либо дискретного (числового) показывающие устройства измерительных приборов выполняют также в виде разнообразных систем типа *шкала*<sup>6.32</sup> – *указатель*<sup>6.30</sup> или *числовое табло*<sup>6.41</sup>.

Из-за сходства схемы *измерительной цепи измерительного канала* [4]) *измерительные приборы*<sup>6.11</sup>, *измерительные установки*<sup>6.12</sup>, *измерительные машины*<sup>6.13</sup>, *измерительные системы*<sup>6.14</sup> и *измерительно-вычислительные комплексы*<sup>6.15</sup> можно отнести к *измерительным системам*.

Обобщая представленную выше схему измерительной цепи ИС, заметим, что на входе элементов электрической *измерительной цепи*<sup>6.24</sup> и выходе из неё электрическая форма сигнала одинакова (напряжение, ток) и отличается только по величине. Измеряемую физическую величину после первичного измерительного преобразователя для последующих звеньев можно представить как *входной сигнал*  $x = x_{\text{вх}}$ . Этот сигнал преобразуется измерительной цепью в *выходной сигнал*  $y = y_{\text{вых}}$ , содержащий количественную информацию об измеряемой физической величине – сигнала *измерительной информации*<sup>5.16</sup>, функционально связанного с измеряемой физической величиной  $y_{\text{вых}} = f_{\text{СИ}}(x_{\text{вх}})$ . Зависимость информативного параметра выходного измерительного сигнала СИ от входного определяется *функцией преобразования средства измерения* [3], которая может быть использована в качестве интегральной *метрологической характеристики* измерительного прибора или системы измерения (рис. 1).

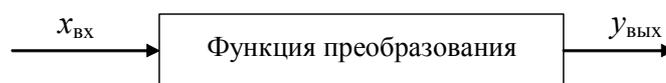


Рис. 1. Преобразование измерительного сигнала

Функция преобразования, представленная в виде формулы, таблицы или графика, используется в рабочих условиях для определения значений измеряемой с помощью СИ величины по известному информативному параметру его входного сигнала.

Различают три вида функций преобразования:

- *номинальную*  $F_{\text{н}}$ , принимаемую для любого экземпляра измерительного преобразователя данного типа и устанавливаемую 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 информативного параметра его выходного сигнала (или наоборот) в тех случаях, когда данные о метрологических характеристиках (МХ) измерительного преобразователя получают из НТД на данный тип измерительного преобразователя.
- *индивидуальную*  $F_{\text{д}}$ , принимаемую для конкретного экземпляра измерительного преобразователя и устанавливаемую, как правило, путем экспериментального исследования этого конкретно-

го экземпляра при определенных значениях влияющих величин. Индивидуальную функцию преобразования используют в условиях, установленных для нее, в тех случаях, когда данные о МХ измерительного преобразователя получают путем непосредственного экспериментального исследования конкретного экземпляра измерительного преобразователя.

- истинную  $F_{и}$ , совершенным образом отражающую зависимость информативного параметра выходного сигнала конкретного экземпляра измерительного преобразователя от информативного параметра его входного сигнала в тех условиях и в тот момент времени, когда функцию определяют.

*Примечания:*

1. Истинная функция преобразования представляет собой идеальное понятие и, в общем, не может быть известна.
2. Индивидуальная функция преобразования должна, по возможности, приближаться к истинной функции преобразования.

В рабочих условиях измерений<sup>11.5</sup> величину измеренного значения физической величины<sup>3.4</sup> свойства объекта измерений<sup>5.19</sup>  $x_{вх}$  в её единицах, преобразованную в выходной сигнал СИ (измерительного прибора)  $y_{вых}$ , получают по измеренным данным регистрации или отсчету<sup>5.15</sup> показаний *показывающего устройства*<sup>6.29</sup> на выходе с помощью функции преобразования [3]  $y_{вых} = f_{си}(x_{вх})$ , определяемой при изготовлении, хранимой в сопроводительной документации СИ, (но не в памяти СИ), или нанесённой на наблюдаемую при измерении<sup>5.14</sup> шкалу физической величины<sup>3.17</sup> средства измерения.

Номинальную функцию  $F_{си}(x_{вх})$  используют в пределах рабочих условий измерения<sup>11.5</sup> для определения значения информативного параметра входного сигнала измерительного преобразователя [3] по известному значению информативного параметра его выходного сигнала [3] (или наоборот) в тех случаях, когда данные о МХ<sup>6.42</sup> измерительного преобразователя получают из *нормативно-технической документации* (НТД) [3] на данный тип средства измерений<sup>6.57</sup>. Измерения по характеру изменения физической величины условно можно разделить на статические<sup>5.6</sup> и динамические<sup>5.7</sup>.

В статическом режиме работы СИ<sup>6</sup> зависимость выходного сигнала от входного называют *статической характеристикой измерительного устройства*.

Номинальную функцию преобразования СИ при статическом измерении<sup>5.6</sup> называют *статической характеристикой СИ* [3], противопоставляя её *полной динамической характеристике СИ* [3]. Функции преобразования при измерениях физических величин в статическом и динамическом режимах [4], существенно отличаются.

Остановимся пока на функции преобразования при измерениях физических величин в *статическом режиме*. Основной характеристикой СИ в статическом режиме является *функция (уравнение) преобразования* – зависимость информативного параметра выходного сигнала от информативного параметра его входного сигнала.

Характер изменения номинальной статической характеристики средства измерений может быть разным (рис. 2):

---

<sup>6</sup> *Статический режим работы СИ* – режим работы СИ при измерении мало изменяющихся во времени (постоянных) величин.

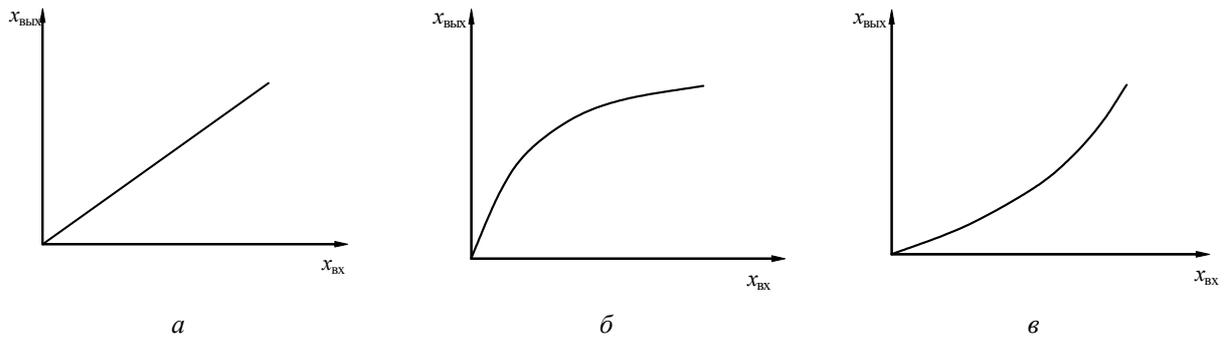


Рис. 2. Статические характеристики средств измерений: а) линейная; б) нелинейная выпуклая; в) нелинейная вогнутая

Основные понятия МХ измерительных приборов и систем связаны со свойствами *нелинейной номинальной статической характеристики* [3] (рис. 3).

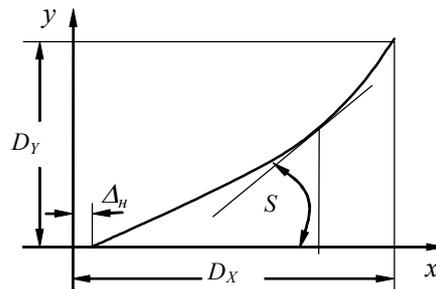


Рис. 3. Параметры нелинейной статической характеристики

К ним относятся:

- *диапазон измерений*<sup>6.46</sup>  $D_x$  – интервал значений физической величины, в пределах которого применимо средство измерения, оцениваемой в единицах ее измерения;
- *диапазон показаний*<sup>6.45</sup>  $D_y$  – интервал значений шкалы прибора, ограниченная *начальным*<sup>6.39</sup> и *конечным значениями шкалы*<sup>6.40</sup>, оцениваемой в единицах ее измерения, которые могут не совпадать (например, килограммы измеряемой величины и вольты показания измерительного прибора);
- *чувствительность*<sup>6.49</sup>  $S$  – предел отношения приращению выходного сигнала  $y$  к приращению измеряемой величины  $x$ , когда последняя стремится к нулю:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{\partial y}{\partial x}.$$

Различают абсолютную и относительную чувствительность.

*Абсолютная чувствительность*<sup>6.49</sup> определяется по формуле:

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta x}.$$

*Относительная чувствительность*<sup>6.49</sup> определяется по формуле:

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta x / x},$$

где  $\Delta I$  – изменение сигнала на выходе;  $x$  – измеряемая величина;  $\Delta x$  – изменение измеряемой величины.

Если статическая характеристика средства измерений линейна, то чувствительность одинакова во всех точках диапазона измерений. Для нелинейных статических характеристик по мере увеличения значения величины физического свойства чувствительность либо монотонно убывает (в случае выпуклой), либо монотонно возрастает (в случае вогнутой).

Средняя чувствительность  $\bar{S}$ <sup>6.49</sup> средства измерений в пределах диапазона измерений определяется как отношение абсолютных величин диапазонов измерений входной и выходной величины:

$$\bar{S} = \frac{Dy_d}{Dx_d}.$$

Выбирая принцип измерения для конкретной области значений измеряемой физической величины, следует обращать внимание на характер нелинейности изменения поведения функции преобразования в части диапазона изменения измеряемой физической величины. Чем круче номинальная статическая характеристика при одной и той же ширине «коридора неопределенности» тем меньше неопределенность<sup>9.20</sup> значения измеряемой величины при однократном измерении.

Для средств измерений с началом отсчета на краю диапазона измерений при увеличении измеряемой (входной) величины выходная величина (выходной сигнал) начинает изменяться только при определенном значении входной величины. Абсолютная величина этого значения  $\Delta_n$  (рис. 3) называется *порогом чувствительности*<sup>6.50</sup>, порогом реагирования или нечувствительностью в нулевой точке.

Неопределенность измерений<sup>9.20</sup>, связанная с обнаружением факта начала реагирования средства измерений на входную величину, исключается заранее предусмотренным смещением начала отсчета выходной величины. Наряду с указанной неопределенностью, под действием различного рода аддитивных помех (внешних и внутренних) возможно случайное смещение начала отсчета, называемое *нестабильностью нуля средства измерения*<sup>10.13</sup>.

В ряде случаев в процессе измерения при медленном непрерывном или шаговом подходе к одному и тому же значению входной величины  $x_j$  один раз с меньшего, а другой раз с большего значения, возникает разность выходной величины, которую называют *вариацией показаний*<sup>6.44</sup>. Причины вариации различны: люфты в механических передачах измерительного преобразователя, трение, *гистерезисные явления* [3] в ферромагнитных материалах электроизмерительных приборов, упругое последствие и т.п.

Кроме перечисленных терминов на практике применяются также термины: *реагирование* и порог реагирования; подвижность средства измерений и порог подвижности; срабатывание и порог срабатывания. Это свидетельствует о том, что терминология для выражения понятий, связанных со свойствами средства измерений реагировать на малые изменения измеряемых величин, еще не устоялась. В целях упорядочения терминологии эти термины следует рассматривать как синонимы и не применять их.

*Зона нечувствительности средства измерений*<sup>6.55</sup> – диапазон значений измеряемой величины, в пределах которого ее изменения не вызывают выходного сигнала средства измерений. Иногда зону называют мертвой. Она наблюдается вблизи некоторых радионавигационных систем или измерительных установок. Например, зона нечувствительности у судовой радиолокационной установки, зависящая от размеров судна и высоты антенны радиолокационной установки над судовыми надстройками.

*Разрешение средства измерений*<sup>6.51</sup> – характеристика средства измерений, выражаемая наименьшим интервалом между величинами объектов, которые фиксируются прибором раздельно. Исходя из указанного определения, различают временное разрешение и пространственное разрешение (по минимальному значению измеряемой физической величины).

*Смещение нуля*<sup>6.53</sup> – показание средства измерений, отличное от нуля, при входном сигнале, равном нулю. Различают смещение механического нуля, наблюдаемое как отклонение указателя от нуля шкалы приборов с механическими указателями, и смещение электрического нуля, наблюдаемое как существование выходного сигнала при нулевом входном сигнале приборов.

*Дрейф показаний средства измерений*<sup>6.54</sup> – изменение показаний средства измерений во времени, обусловленное изменением влияющих величин или других факторов. Если происходит дрейф показаний нуля, то применяют термин *дрейф нуля*. Например, ход хронометра, определяемый как разность поправок к его показаниям, вычисленных в разное время. Обычно ход хронометра определяют за сутки (суточный ход).

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

Для средств измерения постоянных физических величин важным свойством является *время установления показаний СИ* [3], отражающее время реакции средства измерений на воздействие информационного параметра.

Наиболее желательной и широко используемой в современных СИ является простая линейная связь между выходной и входной величинами:  $x_{\text{вых}} = K \cdot x_{\text{вх}}$ , где  $K = f_{\text{СИ}}$  – постоянная величина (рис. 2,а). В действительности физическое явление или эффект, положенные в основу средства измерений, далеко не всегда гарантирует линейность зависимости функции преобразования (рис. 2,б,в). Используемые в сквозных трактах передачи измерительной информации усилители и преобразователи исходного измерительного сигнала приводят к искажению начальной статической характеристики. Эти искажения могут быть обусловлены разными причинами:

- естественными, являющимися следствием состава элементов схемы измерительной цепи (измерительного канала);
- искусственными, исходящими от естественного желания создать линейный характер статической характеристики средства измерений, что необходимо с точки зрения сокращения трудозатрат при градуировке СИ, но недопустимо с точки зрения точности передачи измерительной информации.

В общем виде функция преобразования может быть записана в виде зависимости информативного параметра выходного сигнала  $y$  от информативного параметра его входного сигнала  $x$ :

$$y\{b_0[x], b_1, \dots, b_m, S_1, \dots, S_L, \xi_1, \dots, \xi_k\} = F\{x\{a_0[\psi(t)], a_1, a_2, \dots, a_n\}, S_1, \dots, S_L\},$$

где  $F$  – некоторый функционал, описывающий ряд определенных математических операций, производимых над входной величиной  $x$ .

При разработке СИ стремятся к тому, чтобы обеспечить линейную связь между входной и выходной величинами номинальной функции преобразования:

$$y\{b_0[x], b_1, \dots, b_m, S_1, \dots, S_L, \xi_1, \dots, \xi_k\} = K(S_1, \dots, S_L) x\{a_0[\psi(t)], a_1, a_2, \dots, a_n\},$$

или в упрощенной форме записи  $y(x) = K \cdot x$ , где  $K$  – коэффициент преобразования. На рис. 4 в качестве примера показаны номинальная  $y_{\text{н}} = F_{\text{н}}(x)$  и индивидуальная  $y_{\text{д}} = F_{\text{д}}(x)$  функции преобразования измерительного преобразователя с номинальной линейной статической характеристикой.

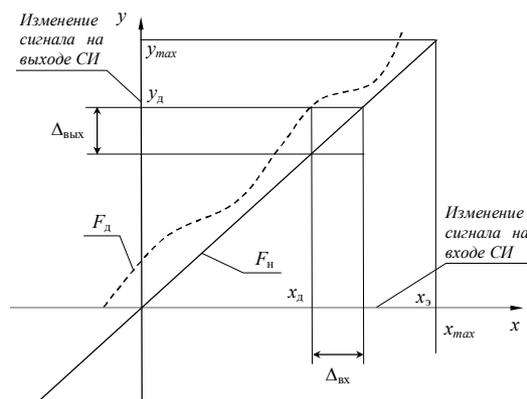


Рис. 4. Номинальная и действительная функции преобразования

Для построения номинальной функции преобразования  $F_{\text{н}}$  достаточно оценить величину значения величины  $x_{\text{э}}$  эталона необходимого разряда, соответствующего диапазону измерения  $x_{\text{max}}$  СИ. Этому эталону будет соответствовать диапазон показаний  $y_{\text{max}}$ , что можно обеспечить при калибровке системы измерения по  $x_{\text{э}}$ . Индивидуальная функция преобразования отличается от номинальной. Если ею воспользоваться для оценки результата измерения по показанию  $y_{\text{д}}$  на выходе СИ, то ему соответствует величина сигнала  $x_{\text{д}}$  на входе СИ. По номинальной функции преобразования показанию  $y_{\text{д}}$  на выходе СИ можно оценить погрешность измерения  $\Delta_{\text{вх}}$ , приведённую ко входу, а по ней – погрешность измерения  $\Delta_{\text{вых}}$  по номинальной линейной функции преобразования  $F_{\text{н}}$ . Полная суммар-

ная погрешность СИ, для которых нормируется номинальная функция преобразования  $\Delta_{\text{вых}} = F_n(x_d) - F_d(x_d) = F_n(x_d) - y_d$ . Она называется *погрешностью по выходу* СИ, поскольку приведена к его выходу. Кроме этого используется *погрешность по входу*  $\Delta_{\text{вх}} = F^{-1}(y_d) - x_d$ , где  $x_d$  – действительное значение информативного параметра измеряемой (входной) величины;  $F^{-1}(y_d)$  – функция, обратная номинальной функции преобразования СИ, называемая его *градуировочной характеристикой*<sup>6.52</sup>.

*Градуировочные характеристики* конкретных СИ можно рассматривать как экспериментальные модели *индивидуальной функции преобразования*. Индивидуальные функции преобразования измерительных преобразователей и приборов могут значительно отличаться от номинальных. Функцию преобразования конкретного экземпляра системы измерения совершенным образом отражающую зависимость информативного параметра выходного сигнала от информативного параметра его входного сигнала в тех условиях и в тот момент времени, когда функцию определяют, называют *истинной функцией преобразования* [3]. Истинная функция преобразования представляет собой идеальное понятие и, в общем, не может быть известна. Каждый конкретный экземпляр измерительного преобразователя имеет индивидуальную функцию преобразования, которую получают путем непосредственного экспериментального исследования и используют в условиях, установленных для нее. Она должна, по возможности, приближаться к истинной функции преобразования.

Для измерительных приборов и систем измерения не достаточно ограничиться только этим набором средств, подтверждающих факт прохождения калибровки. МХ СИ могут изменяться в процессе эксплуатации. Изменение МХ средств измерений во времени обусловлено процессами старения в его узлах и элементах, вызванными взаимодействием с внешней окружающей средой. Эти процессы протекают в основном на молекулярном уровне и не зависят от того, находится ли СИ в эксплуатации или хранится на консервации. Следовательно, основным фактором, определяющим старение СИ, является календарное время, прошедшее с момента их изготовления, т.е. возраст. Скорость старения зависит, прежде всего, от используемых материалов и технологии. Исследования показали, что необратимые процессы, изменяющие погрешность СИ, протекают очень медленно и зафиксировать эти изменения в ходе эксперимента в большинстве случаев невозможно.

В соответствии с [1] обязательные *испытания образцов средств измерений*<sup>13.13</sup> в сферах распространения *государственного метрологического контроля*<sup>13.11</sup> и *надзора*<sup>13.12</sup> проводятся с целью *утверждения типа*<sup>13.14</sup> средств измерений при его разработке. Установление органом *государственной метрологической службы*<sup>13.5</sup> (или другим официально уполномоченным органом, организацией) пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям, осуществляется при *первичной*<sup>13.16</sup>, *периодической*<sup>13.17</sup>, *внеочередной*<sup>13.18</sup>, *инспекционной*<sup>13.19</sup>, *комплектной*<sup>13.20</sup>, *поэлементной*<sup>13.21</sup> и *выборочной*<sup>13.22</sup> *поверках средств измерений*<sup>13.15</sup>. В период времени между поверками конкретного средства измерений имеется неопределённость в результате и приходится только надеяться на верность СИ.

Состав погрешностей средств измерений<sup>10.1</sup> в [2] отличается от состава погрешностей измерений<sup>9.1</sup>. В нём оставлены систематическая<sup>10.2</sup>, случайная<sup>10.3</sup> со случайной составляющей от гистерезиса [3, 4], которые могут быть представлены в абсолютной<sup>10.4</sup>, относительной<sup>10.5</sup> и приведенной<sup>10.6</sup> формах. Погрешности средств измерений в зависимости от условий применения разделяют на, основные<sup>10.7</sup>, дополнительные<sup>10.8</sup>, статические<sup>10.9</sup> и, динамические<sup>10.10</sup>. Все эти погрешности для статических измерений<sup>5.6</sup> определяются при многократных измерениях. Для однократных<sup>5.4</sup> динамических измерений<sup>5.7</sup> возникает проблема невозможности получения статистических данных для таких погрешностей как систематическая<sup>10.2</sup> и случайная<sup>10.3</sup>, определяемых после обработки статистики многократных измерений, проведенных в одних и тех же условиях, что невозможно.

Такие МХ СИ как диапазон измерений, диапазон показаний, чувствительность (абсолютная, относительная, средняя), порог чувствительности, нестабильность нуля, зона нечувствительности, разрешение, смещение нуля, дрейф показаний, дрейф нуля, время установления показаний, а также погрешности при однократных измерениях могут быть получены только из анализа *индивидуальной функции преобразования*  $F_n$ .

Для ряда технических задач:

- оценки границ приемочного допуска<sup>7</sup>, обеспечивающих допустимую вероятность риска заказчика<sup>8</sup> при приёмке продукции [7];
- телеметрическом контроле параметров летательных аппаратов [8];
- выборе величины коррекции расчётных точек инструментов на завершающих переходах формирования поверхностей деталей [9] при проектировании технологии обработки деталей на станках с ЧПУ;
- необходимо знать интервал, соответствующий *неопределённости измерений*<sup>9,20</sup>, и вид закона распределения погрешности *однократного измерения для определения достоверных границ погрешности результата измерения*<sup>9,16</sup>.

Повторяя определение индивидуальной функции преобразования СИ  $y_{\text{вых}} = f_{\text{СИ}}(x_{\text{вх}})$  можно заметить, что она изменяется при каждой реализации. Аналогичным образом изменяются погрешности по выходу и входу. Поэтому возникает задача обобщения совокупности индивидуальных функций преобразования конкретного СИ, позволяющего решить большинство вопросов связанных с МХ этого СИ.

Весь набор МХ измерительных приборов и систем с линейными и нелинейными реальными статическими характеристиками может быть получен только по совокупности градуировочных характеристик, определённых для рабочих условий средства измерения, полученных как можно ближе по времени к процессу измерения. Для оперативного обращения к функции преобразования с целью оценить величину и погрешность однократного измерения измеряемого свойства необходимо иметь доступ к совокупности градуировочных характеристик, хранящихся в памяти СИ.

Следовательно для оперативного получения доступа к оценке МХ измерительных каналов СИ необходимо:

- обеспечить сохранение в памяти СИ обобщённой информации о совокупности градуировочных характеристик, определённых для рабочих условий средства измерения, полученных как можно ближе по времени к процессу измерения;
- разработать методическое обеспечение для определения полного состава МХ для статических измерений, дополненного погрешностью однократного измерения с оценкой закона распределения неопределённости измеренного значения физической величины, позволяющего производить оценку МХ в реальных условиях непосредственно перед проведением измерений физических свойств объекта измерения.

## 2. Статическая градуировка средств измерений

Единых правил градуировки измерительных приборов и систем, представленных в системе стандартов государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) нет. Существует множество частных методик градуировки различных приборов и измерительных систем.

Для определения содержания в измеряемом свойстве объекта измерения количества единиц  $q$  *постоянной физической величины*  $Q$  по зарегистрированному выходному сигналу СИ оно должно быть *проградуировано* в диапазоне значений, охватывающем окрестность значения измеряемой физической величины.

Общие принципы градуировки измерительных приборов и систем измерения в соответствии с [5] сводятся к следующему.

1. Поскольку об измеренной физической величине судят по показанию на выходе измерительного прибора, то начало и конец точек градуировки определяется по *диапазону показаний* канала СИ,

<sup>7</sup>Приемочный допуск – разность между заданными наибольшим и наименьшим предельными значениями физических и химических свойств, уменьшенная на интервал, обусловленный погрешностями их измерения.

<sup>8</sup>Вероятность риска заказчика – вероятность того, что в составе принятых объектов, соответствующих заданному полю допуска окажутся объекты не соответствующие этому полю.

которому соответствует *диапазон измерений* канала СИ. Число градуируемых точек и порядок их расположения зависит от характера зависимости  $y = f(x)$ , определяемого при *опробовании*.

В соответствии с характером изменения зависимости  $y = f(x)$ , полученной при опробовании, первой задачей является определение способа интерполяции, необходимого и достаточного количество градуируемых точек, обеспечивающее необходимую точность формы градуировочной характеристики. В действующих методических материалах это количество не превосходит 15.

2. В диапазоне показаний СИ, соответствующем диапазону измерения, охватывающего окрестность ожидаемого значения измеряемой физической величины, выделяют на несколько градуируемых точек для воздействия на чувствительный элемент СИ (вход системы измерения), осуществляемый эталонами или *мерами физической величины*<sup>6,10</sup>, отражающими части эталона с высокой точностью (например, наборы концевых мер длины или гирь). Воздействия осуществляют поочередно в двух противоположных направлениях: при переходе от наименьшего значения меры к наибольшему и наоборот. В таком случае градуировка учтёт неизбежный *гистерезис* СИ [3].

Для каждой  $j$ -той меры ( $j = 1 \dots m$ ) при повторении акта воздействия на чувствительный элемент СИ  $x_{ji} = x_{ji \text{ вх}}$  реакция системы измерения  $y_{ji \text{ вых}} = f x_{ji \text{ вх}}$  будет неодинакова (рис. 5).

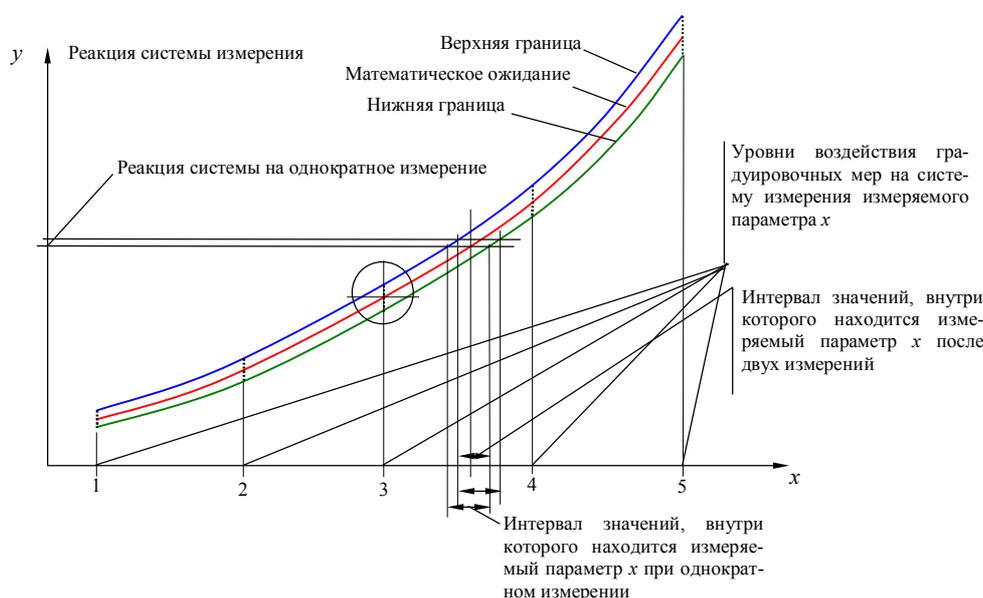


Рис. 5. Градуировка средств измерения: 1, 2, ..., n – эталоны или меры, соответствующие точкам градуировки

Все множество значений *выходных сигналов*, соответствующих каждой измеренной  $j$ -той мере или *отсчётов показаний средства измерения* для каждой  $j$ -той меры, полученных при неизменных условиях (температура и влажность окружающей среды и т. п. внешних воздействиях), можно считать случайными событиями. Совокупность результатов наблюдений  $y_{ij}$  образует эмпирические вариационные ряды.

После проведения  $n$  циклов градуировки данные запоминают для дальнейшей обработки.

3. Обработывая статистику *отсчётов показаний средства измерения* для каждой  $j$ -той меры получим размах  $R_{vj}$ , математическое ожидание  $\mu_{yj}$  и дисперсию  $D_{yj}$ .

Размах определяют по расстоянию между точками верхних  $y_{ij \text{ max}}$  и нижних  $y_{ij \text{ min}}$  значений вариационных рядов каждой измеряемой прибором меры градуируемых точек. Математическое ожидание определяют по результатам обработки данных экспериментального вариационного ряда по формуле

$$\mu_{yj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ji} .$$

где  $y_{ij}$  – результат одного испытания при градуировке,  $i$  – порядковый номер испытания на  $j$ -той полке.

Промежуточные значения между точками верхних и нижних значений вариационных размахов и математических ожиданий всех мер можно интерполировать линейно или криволинейно. В результате образуется коридор, внутри которого находится всё множество градуировочных характеристик исследуемой измерительной системы.

Для того чтобы по коридору можно было определять МХ СИ, необходимо, чтобы ширина этого коридора охватывала всё множество градуировочных характеристик, полученных по описанной выше технологии, с высокой достоверительной вероятностью и статистической надёжностью<sup>9</sup>.

Если воспользоваться *непараметрическими толерантными пределами* [6], задавшись достоверительной вероятностью  $P_d$  и статистической надёжностью  $\gamma$  по формуле:

$$nP^{(n-1)} - (n-1)P^n = 1 - \gamma \tag{1}$$

можно определить число  $n$  градуировочных процедур на каждой градуировочной точке.

Минимальные объемы выборок для определения достоверительных границ непараметрических толерантных интервалов для разных сочетаний значений  $P_d$  и  $\gamma$  на каждой градуируемой точке представлены в табл. 1.

Таблица 1. Назначения объемов выборки

$P_d \backslash \gamma$	0,9	0,95	0,99	0,9973
0,75	13	18	24	29
0,8	18	22	31	37
0,9	38	46	64	78
0,95	77	93	130	159
0,99	388	473	662	809
0,9973	1140	1756	2456	3006

Например, для  $\gamma = 0,95$  и  $P = 0,99$  из этого уравнения (1) найдем приближенное значение повторения актов градуировки на каждой градуируемой точке  $n = 130$ . Таким образом, имея выборку объема 130, взятую из генеральной совокупности с непрерывным распределением признака  $x$ , можно со статистической надёжностью 0,95 утверждать, что между крайними членами ее лежит не менее 0,99 всей генеральной совокупности. Всего для получения градуировочной характеристики с такой достоверительной вероятностью и статистической надёжностью необходимо провести 130  $n$  актов градуировки на всех градуируемых точках.

На каждой градуируемой точке минимальные и максимальные значения реакций системы измерения  $y_{jmax}, y_{jmin}$  размаха  $R_{yj}$  и математических ожиданий  $\mu_{yj}$  соответствуют достоверительной вероятности  $P_d$  и статистической надёжности  $\gamma$  для совокупности градуировочных характеристик при условиях градуировки, определяющих *влияющие физические величины*<sup>3,9</sup>. По этим значениям строят коридор неопределенности значений измеряемой физической величины и осреднённую градуировочную характеристику, соответствующие достоверительной вероятности  $P_d$  и статистической надёжности  $\gamma$  – так называемые *предельные и осреднённые градуировочные характеристики рабочего средства измерений*.

4. Полученные значения предельных значений (максимальных, минимальных) и осреднённых математических ожиданий  $\mu_{yj}$  результатов градуировки и алгоритм построения кривых, по которому можно построить функции  $y_{max\ вых} = f(x_{ji\ вх})$ ,  $y_{min\ вых} = f(x_{ji\ вх})$  и  $y_{\mu\ вых} = f(x_{ji\ вх})$  запоминают.

<sup>9</sup>Статистическая надёжность состоит в следующем. Обработывая статистически ряд случайных выборок из генеральной совокупности событий, подчиняющейся в пределе нормальному (гауссовскому) закону, для каждой из выборок могут быть получены значения границ интервалов, соответствующих данной достоверительной вероятности. На этих границах, как на случайных событиях в свою очередь могут быть построены достоверительные интервалы. Статистическая надёжность  $\gamma$  соответствует достоверительной вероятности того, что границы достоверительных интервалов рассеяния границ, соответствующих данной достоверительной вероятности окажутся внутри этого достоверительного интервала.

В системе координат  $x, y$  где  $x$  значение физической величины, в пределах которого применимо средство измерения, оцениваемой в единицах ее измерения, а  $y$  значение показания прибора, оцениваемое в единицах ее измерения, которые могут не совпадать, выбрав метод интерполирования градуировочных кривых (линейный, с непрерывными первой или второй производными) по полученным точкам определяют предельные границы неопределенности результата однократного измерения, соответствующие заданной вероятности  $P_d$  и статистической надежности  $\gamma$  и также запоминают в памяти СИ.

Осреднённая градуировочная характеристика рабочего средства измерений даст возможность определить чувствительность (абсолютную, относительную, среднюю), порог чувствительности, нестабильность нуля, зону нечувствительности, разрешение, смещение нуля, дрейф показаний, дрейф нуля, время установления показаний для множества измерений, проводимых в межповерочный период или в приемлемый период времени после поверки со значениями соответствующими доверительной вероятности  $P_d$  и статистической надёжности  $\gamma$ , полученными при градуировке.

5. При однократном измерении физической величины по показанию средства измерения и сохраненным границам совокупности градуировочных кривых определяют границы интервала неопределенности и предполагаемое положение центра группирования значения измеренной физической величины (рис. 5). Погрешность однократного измерения можно определить по интервалу неопределённости, который находится между предельными границами коридора действительных значений измеренной физической величины. Его можно вывести на печать вместе со значением математического ожидания  $\mu_{y_j}$ , соответствующего значениям показаний средства измерения, или передать в систему обработки измерительной информации.

При повторном измерении той же физической величины получают другое показание средства измерения, которому соответствует другой интервал неопределенности. Общий (перекрывающийся) интервал для двух интервалов неопределенности будет меньше предыдущего. В пределах этого интервала должно находиться искомое значение измеряемой физической величины. Дальнейшие повторяющиеся измерения той же физической величины приводят к уменьшению общего интервала неопределенности для всех интервалов неопределенности каждого из повторяющихся измерений в пределе до сколь угодно малой величины, что приближает к процессу определения систематических и случайных погрешностей по статистике многократных измерений.

6. В реальной жизни ни один из законов распределения не выполняется. Однако некоторая часть из них имеет большой практический интерес. Этот интерес сводится к следующему. Допустим, что случайная величина изменяется на некотором ограниченном или неограниченном интервале по закону распределения, параметры которого (границы размаха, математическое ожидание или дисперсия) известны. Каким должен быть закон с известными параметрами, имеющий те же границы, математическое ожидание или дисперсию, чтобы интервал, соответствующий заданной вероятности  $P$ , был наибольшим из всех возможных?

Если такой закон использовать при оценках практических интервалов рассеяния реальных распределений, имеющих те же границы, математическое ожидание и дисперсию, что и у закона распределения, используемого вместо реального, то интервал рассеяния реального закона при тех же значениях вероятности  $P$  меньше и будет находиться внутри *практического интервала рассеяния* модельного закона, используемого вместо реального. Следовательно, при любых реальных законах распределений, имеющих те же границы изменения, математическое ожидание или дисперсию, оценка *практического интервала рассеяния* реального распределения, выполненная по закону, используемого вместо реального, будет наибольшей (то есть оценка «сверху»).

Случайная погрешность характеризует неопределенность наших знаний об истинном значении измеряемой величины, полученных в результате проведенных наблюдений. Согласно К. Шеннону мерой неопределенности ситуации, описываемой случайной величиной  $x$ , является энтропия [10]:

$$H = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx,$$

являющаяся функционалом дифференциальной функции распределения вероятностей  $p(x)$ . Под энтропией понимается информационная неопределенность, характеризуемая величиной интервала, соответствующего заданной доверительной вероятности  $P_d$ .

Можно предположить, что любой процесс измерения формируется таким образом, что неопределенность результата наблюдений оказывается наибольшей в некоторых пределах, определяемых допускаемыми значениями погрешности, соответствующей доверительной вероятности  $P_d$ . Поэтому наиболее вероятными должны быть такие распределения вероятностей  $p(x)$ , при которых энтропия обращается в максимум.

В ряде теорем теории информации Шеннон доказал, что энтропия непрерывного процесса со случайной координатой, принимающей значения только на заданном отрезке  $[a, b]$ , максимальна при равномерной (равновероятной) плотности распределения вероятностей.

В случае, когда известна дисперсия  $D_x$  случайной координаты непрерывного процесса, то интервал, соответствующий заданной вероятности  $P_d$  максимален при нормальном законе распределения вероятностей с той же дисперсией.

Для существенно положительных величин с заданным средним (математическим ожиданием  $\mu_x$ ), интервал, соответствующий заданной вероятности  $P_d$  максимален при экспоненциальном законе распределения вероятностей.

Отсюда следуют важные для практических расчетов рекомендации.

Если известно, что параметр не выходит за пределы отрезка  $[a, b]$ , то независимо от действительного характера его распределения на этом отрезке максимальная неопределенность и, соответственно, практический интервал рассеяния будет при равновероятном законе. Иными словами, если на этом интервале параметр распределен по любому закону, отличному от равновероятного, интервалы рассеяния его при той же вероятности  $P$  находятся внутри интервала равновероятного распределения вероятностей.

В случае, когда известна дисперсия  $D_x$  параметра, функция распределения вероятностей  $p(x)$  изменяется на неограниченном интервале  $(-\infty < x < +\infty)$ , интервал рассеяния его при той же вероятности  $P$  будет наибольшим, если параметр распределен по нормальному закону распределения вероятностей с дисперсией  $D_x$ . Интервалы рассеяния других распределений, имеющих то же значение  $D_x$ , при той же вероятности  $P$  находятся внутри интервала нормального распределения.

Наконец, если параметр существенно положителен, функция распределения вероятностей  $p(x)$  изменяется на неограниченном интервале  $(0 < x < +\infty)$ , то при одном и том же математическом ожидании  $\mu_x$  и вероятности  $P$  интервал экспоненциального закона будет охватывать аналогичные интервалы любых других распределений на неограниченном интервале  $(0 < x < +\infty)$ .

При однократном измерении физической величины по показанию средства измерения и сохраненным градуировочным кривым определяют границы интервала неопределенности и предполагаемое положение центра группирования значения измеренной физической величины (область, выделенная кругом на рис. 5).

Если при статистической обработке результатов наблюдений в вариационном ряду на каждой градуируемой точке, исходить из принятой в [10] гипотезы о нормальном распределении вероятностей  $p(y_i)$  то о распределении погрешности измерения  $p(x)$  ничего определенного сказать нельзя (см. рис. 6).

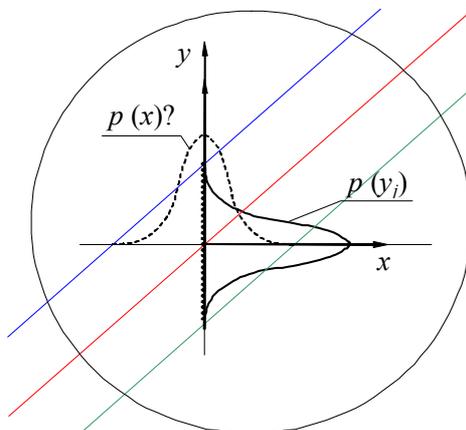


Рис. 6. К определению закона распределения неопределенности измеренного значения

Это обстоятельство вызывает ряд трудностей при приемке продукции, поскольку не предоставляет возможности учесть характер погрешности определения значения физической величины и оценить границы приемочного допуска, обеспечивающие допустимую вероятность риска заказчика, снижает достоверность измеренных данных бортовой телеметрии летательных аппаратов и т. п.

Если в качестве результатов обработки градуировочных данных использовать градуировочные кривые, построенные по верхней и нижней границам вариационных размахов, то наиболее приемлемым распределением на интервале между предельными границами коридора градуировки в соответствии с [10] будет *равновероятное распределение*, обеспечивающее наибольший интервал неопределённости значения измеренного свойства (рис. 7).

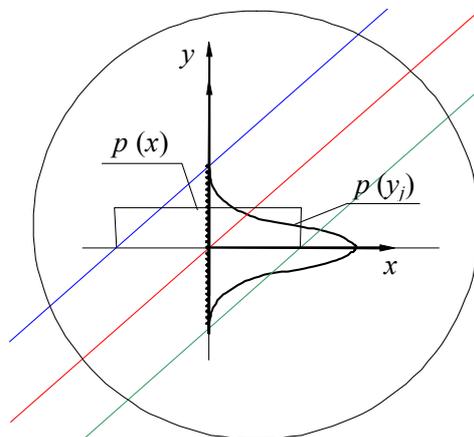


Рис. 7. К определению закона распределения неопределенности измеренного значения по одной из теорем К. Шеннона

Таким образом, с помощью предлагаемой методики градуировки могут быть получены все МХ измерительных приборов и систем с нелинейной функцией преобразования, позволяющей оценить не только погрешности измерения при многократных измерениях, но и погрешности однократного измерения.

Недостатком такого метода построения предельного коридора неопределенности значений измеряемой физической величины и осреднённой градуировочной характеристики средства измерения является слишком большой объём экспериментальной работы при градуировке с высокой вероятностью  $P_d$  и статистической надёжностью  $\gamma$ .

Существенное сокращение объёма экспериментальной работы может быть достигнуто за счёт использования при обработке статистики *отсчётов показаний средства измерения* для каждой  $j$ -той меры получим не только размах  $R_{vj}$ , математическое ожидание  $\mu_{yj}$ ; но и дисперсию  $D_{yj}$ .

Дисперсию определяют по формуле:

$$D_{yj} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_{yj})^2 = \sigma_{yj}^2.$$

Исходя из гипотезы о нормальном распределении результатов наблюдений в вариационном ряду, по вычисленным  $\mu_{yj}$ ,  $\sigma_{yj}$  определяют его уравнение:

$$p(y_j) = e^{-\frac{(y_i - \mu_{yj})^2}{2\sigma_{yj}^2}} / \sigma_{yj} \sqrt{2\pi}.$$

Доверительный интервал  $P_d$  определяют количеством значений  $\sigma_{yj}$ . Для доверительной вероятности  $P_d = 0,9973$  это  $\pm 3\sigma_{yj}$ ; для  $P_d = 0,95$  это  $\pm 2\sigma_{yj}$ .

Что же касается статистической надёжности, полученной при таком решении, её можно определить по количеству  $n$  и формуле (1).

## Выводы

1. В терминах основных понятий метрологии представлены особенности технических измерений в машиностроении и метрологические характеристики СИ при статических измерениях.
2. Показано, что зависимость информативного параметра выходного измерительного сигнала СИ от входного определяется *функцией преобразования средства измерения*, которая может быть использована в качестве интегральной *метрологической характеристики* (МХ) СИ.
3. Разработаны основы построения методики статической градуировки СИ, позволяющей определить помимо обязательных МХ, ещё и такие дополнительные МХ как чувствительность (абсолютную, относительную, среднюю), порог чувствительности, нестабильность нуля, зону нечувствительности, разрешение, смещение нуля, дрейф показаний, дрейф нуля, время установления показаний, погрешность однократного измерения для множества измерений, проводимых в межповерочный период со значениями близкими к доверительной вероятности  $P_d$  и статистической надёжности  $\gamma$ .

## Список литературы

1. Закон РФ «Об обеспечении единства измерений». В ред. Федеральных законов от 30.11.2011 N 347-ФЗ.
2. РМГ 29-99\* ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» ИПК Издательство стандартов 2003.
3. ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
4. ГОСТ Р 8.596-2002. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.
5. ГОСТ 8.010-90 ГСИ. Методики выполнения измерений.
6. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Теории вероятностей и математическая статистика в технике (общая часть). – М.: Гостехтеориздат, 1955. – С. 556.
7. Марков Н. Н., Кайнер Г. Б., Сацердотов П. А. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. – М., 1967. – С. 395.
8. МИ 222-80. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем по метрологическим характеристикам компонентов.
9. Кашуба Л.А., Волков А. А., Особенности проектирования технологии обработки высокоточных деталей на станках с ЧПУ // Тезисы XXXV Академических чтений по космонавтике, Москва, 2011. – С. 570-571.
10. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – С. 830.