

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный технологический университет
растительных полимеров»

80-летию СПбГТУРП посвящается

МЕТРОЛОГИЯ

Учебное пособие

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по основным образовательным программам подготовки бакалавров направления 220400 "Управление в технических системах"

Санкт-Петербург

2011

УДК 658.562(075)

ББК 331.1я7

M546

Метрология: учебное пособие/ Г.А.Кондрашкова, А.В.Черникова, И.В.Бондаренкова, Г.А.Кнодель, И.С.Ковчин, В.П.Яковлев / СПбГТУРП. - СПб., 2011. – 153 с.

В учебном пособии излагаются основные вопросы теоретической, законодательной и прикладной метрологии. Рассматриваются основы теории измерений, методы и средства обеспечения единства и достоверности измерений. Пособие предназначено для студентов технических специальностей, бакалавров по направлению 220400 "Управление в технических системах" и 220700 "Автоматизация технологических процессов и производств".

Рецензенты:

руководитель лаборатории электроэнергетики ГИП ВНИИМ им.Д.И.Менделеева, д-р техн. наук Е.З.Шапиро
заведующий кафедрой АПП СПбТИ (Технический университет), д-р техн. наук, профессор Л.А.Русинов

© Кондрашкова Г.А., Черникова А.В.,
Бондаренкова И.В., Кнодель Г.А., Ковчин И.С.,
Яковлев В.П., 2011

© ФГБОУВПО Санкт-Петербургский
государственный технологический университет
растительных полимеров, 2011

Введение

Развитие рыночной экономики и мировые проблемы экономии энерго- и материальных ресурсов сопровождаются бурным ростом информационных технологий, в том числе информационно-измерительного обеспечения, принятия оптимальных решений во всех сферах человеческой деятельности.

Опережающее совершенствование преобразования информации, особенно в любых системах управления, дает основание для получения конкурентоспособной и качественной продукции в сжатые сроки ее производства.

Одним из важнейших путей познания является измерительная информация и наука об измерениях – метрология - играющая значительную роль в современном мире.

Наука, в том числе раздел философии – гносеология, промышленность, медицина, экономика, экология и другие отрасли деятельности не могут обходиться без измерений. Более того, чем больше развиты измерения в той или иной отрасли знаний или производства, тем успешнее идет их совершенствование. К измерительным процедурам относятся до 35 % затрат общественного труда, особенно в передовых индустриальных странах, каждую секунду в мире совершаются миллиарды измерений для контроля, диагностики, идентификации объектов изучения и управления.

Метрология представляет собой, с одной стороны, научную, с другой – практическую дисциплину, которая позволяет обеспечить единство измерений в различных сферах деятельности. Метрология – это наука об измерениях, способах и средствах обеспечения их единства и методах достижения требуемой точности результатов измерений. Современная метрология является синтетической дисциплиной, включающей в себя научный, прикладной и административно-правовой аспекты.

Поэтому актуальной проблемой в образовании специалистов по управлению и автоматизации технологических процессов, в частности в

целлюлозно-бумажном производстве, является изучение метрологии, дающее возможность

- знать теоретические, законодательные и прикладные аспекты обеспечения единства измерений;

- уметь пользоваться средствами измерений и анализировать результаты измерений и их неопределенности;

- владеть методами, методиками и практическими навыками измерения физических величин.

Раздел 1. Теоретические основы метрологии

Глава 1. Основные понятия метрологии

1.1. Физические свойства, величины и шкалы

Все объекты (явления, процессы и т.п.) окружающего мира характеризуются различными свойствами.

Свойство – философская категория, выражающая такую сторону объекта, которая обуславливает его различие или общность с другими объектами и обнаруживается в его отношениях с ними. Свойство отражает качественную сторону объекта. Для количественной характеристики различных свойств объектов используется понятие величины, хотя не каждое свойство может быть охарактеризовано количественно. **Величина** – это свойство, общее в качественном отношении многим объектам, а в количественном отношении индивидуальное для каждого из них. Понятие величины является основополагающим в метрологии, так как является предметом изучения (измерения).

Классификация величин в наиболее общем виде представлена на рис.1.1 [1].

Прежде всего, величины делятся на **реальные** и **идеальные**. Идеальной величиной является любое числовое значение. По существу – это математическая абстракция, не связанная с каким-либо реальным объектом. Поэтому идеальные величины рассматриваются не в метрологии, а в математике.

Реальные величины делятся на **физические** и **нефизические**. Нефизические величины вводят, определяют и изучают в информатике, общественных, экономических и гуманитарных научных дисциплинах (например, в социологии, лингвистике). Примерами нефизических величин являются количество информации в битах, различные рейтинги, определяемые путем социологических опросов. Физические величины,

рассматриваемые в метрологии, являются свойствами материальных объектов, процессов и явлений. В отличие от нефизических, они объективно, независимо от желания человека существуют в окружающем нас материальном мире.

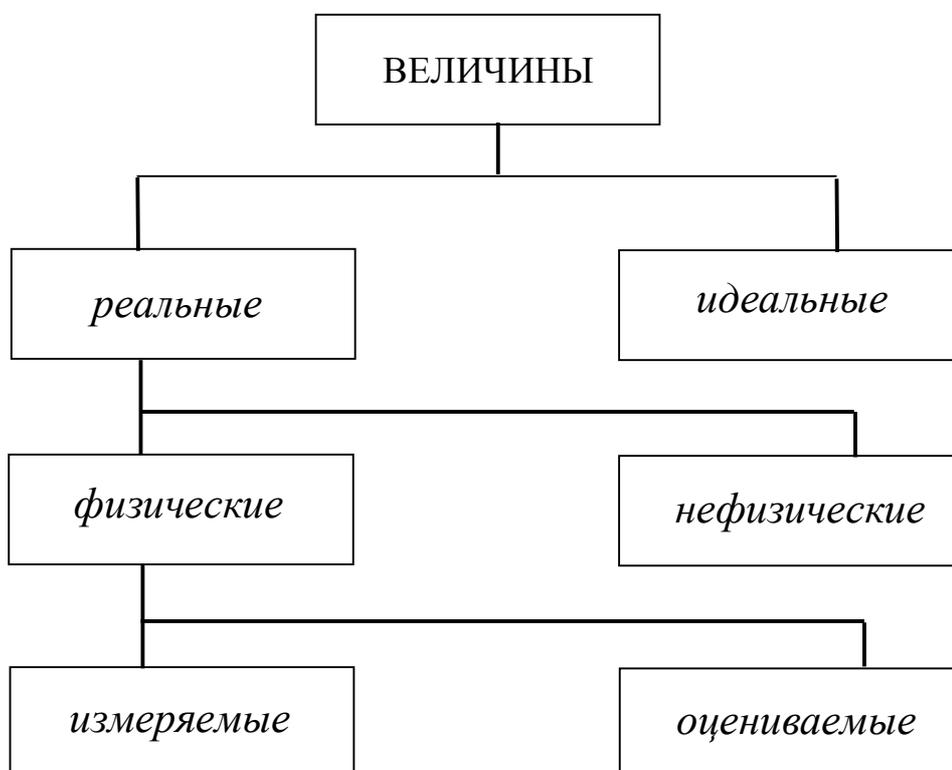


Рис.1.1. Классификация величин

Физические величины по способу количественного оценивания разделяют на *измеряемые* и *оцениваемые*. Отличительной особенностью измерений является наличие *средства измерений* (СИ) – специального технического средства, хранящего размер единицы, с помощью которого определяется значение величины. К оцениванию относят, прежде всего, экспертные и органолептические (с помощью органов чувств человека) оценки величин, такие, например, как определение расстояния «на глаз». Здесь нет технического средства, хранящего размер единицы, поэтому нет и уверенности в требуемой точности полученной оценки. Гарантии объективности результата оценивания может дать только применение

технического средства, лишенного человеческих недостатков. Именно поэтому измерения являются высшей формой количественного оценивания величин.

В [2] под *измерением* понимается сравнение физической величины с ее единицей с помощью специальных технических средств.

Однако это определение не охватывает значительное количество оцениваемых с помощью технических средств физических величин, для которых в принципе невозможно ввести единицы [1]. С одной стороны, поскольку нет единицы, то, в соответствии с определением, это не измерение, а оценивание. С другой стороны, при такой постановке вопроса большое число физических величин, важных для производства и общества, оценивание которых осуществляется с помощью технических средств, окажется вне практической метрологии, что, конечно, недопустимо. Чтобы разрешить это противоречие, необходимо расширить определение измерения. С этой целью вводится понятие «шкала величины». По аналогии с определением единицы его можно определить так:

шкала величины — это упорядоченная совокупность размеров величины, которым условно присвоены определенные значения; она применяется для количественного выражения однородных с ней величин. В соответствии с логической структурой проявления свойств различают пять основных типов шкал.

1. *Шкала наименований* (шкала классификации). Такие шкалы используются для классификации объектов, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности. Относительно двух объектов А и В этого класса можно утверждать только следующее: $A = B$ (А тождественно В) или $A \neq B$. Эти свойства невозможно охарактеризовать количественно, а в их шкалах отсутствуют понятия «больше» или «меньше» нуля и единицы. Пример такой шкалы — шкала классификации цвета объектов по наименованиям (красный, зеленый и т. д.), опирающаяся на

стандартизованные атласы набора цветов. Другими примерами шкал наименований являются различные классификации элементов изделия: по виду или типу, по потребляемой энергии и др.

2. **Шкала порядка** (шкала рангов). Эта шкала является монотонно возрастающей или убывающей и позволяет установить отношения эквивалентности и порядка ($A < B$ или $A > B$) между величинами, характеризующими это свойство. В шкале порядка можно установить иерархию объектов относительно оцениваемого свойства, поскольку если $A < B$ и $B < C$, то $A < C$. К шкалам порядка относятся условные шкалы — шкалы, значения которых выражены в условных единицах (например, 12-балльная шкала Бофорта для силы морского ветра). Широкое распространение получили шкалы порядка с нанесенными на них реперными точками. К таким шкалам относятся различные шкалы твердости — Пинелля, Роквелла, Виккерса и др.

Например, шкала Мооса для определения твердости минералов содержит 10 реперных минералов, которым приписаны условные числа твердости: тальк — 1, гипс — 2, кальций — 3, флюорит — 4, апатит — 5, ортоклаз — 6, кварц — 7, топаз — 8, корунд — 9, алмаз — 10. Оценивание твердости минерала осуществляется путем его царапания реперными минералами. Если, например, после царапания минерала кварцем 7 на нем остается след, а после ортоклаза 6 — не остается, то его твердость удовлетворяет неравенству $6 < X < 7$.

3. **Шкала интервалов** (шкала разностей). Эти шкалы применяются для объектов, свойства которых удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности разностей величин. Аддитивная величина — однородная физическая величина, значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент, разделены друг на друга, следовательно, если $A - B = x_1$ и $B - C = x_2$, то

$$A - C = (A - B) + (B - C) = q_1 + q_2, (A - B) \cdot p = q_1 \cdot p \text{ и } \frac{A - B}{B - C} = \frac{q_1}{q_2}.$$

Шкала интервалов состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу и одну произвольно выбранную нулевую точку. Такими шкалами являются температурные шкалы Цельсия, Фаренгейта и Реомюра, летоисчисление по различным календарям.

Шкалы интервалов имеют условные (принятые по соглашению) единицы и условные нули, опирающиеся на какие-либо реперы. Они описываются уравнением

$$X = X_0 + x[X], \quad (1.1)$$

где X — значение величины;

X_0 — нулевая точка шкалы;

x — числовое значение;

$[X]$ — единица величины.

Видно, что интервал между двумя любыми величинами X_1 и X_2 , равный $X_1 - X_2 = (x_1 - x_2)[X]$, удовлетворяет основному уравнению измерений. Поэтому в этих шкалах разность величин также является величиной, которая имеет понятный физический смысл. В то же время сумма величин $X_1 + X_2 = 2X_0 + (x_1 + x_2)[X]$ не удовлетворяет ни основному уравнению измерений, ни уравнению шкалы интервалов. Поэтому в шкале интервалов сумма величин не имеет физического смысла. Например, разность температур двух тел — это температура, на которую надо нагреть одно из тел, чтобы их температуры сравнялись, а сумма температур двух тел не имеет физического смысла. Точно также разность двух определенных дат календаря имеет ясный физический смысл — продолжительность периода времени, ограниченного этими датами, а сумма этих дат не имеет физического смысла.

4. *Шкала отношений.* Эти шкалы описывают свойства объектов,

которые удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности. Примерами таких шкал являются шкалы массы, длины, силы электрического тока и многие другие. В шкалах отношений существуют условные единицы и естественные нули. Поэтому они удовлетворяют уравнению

$$X = x[X], \quad (1.2)$$

где X — значение величины;

$[X]$ — единица величины;

x — числовое значение.

Из того, что сумма величин $X_1 = x_1[X]$, и $X_2 = x_2[X]$, равняющаяся $X_1 + X_2 = (x_1 + x_2)[X]$, удовлетворяет основному уравнению измерений и уравнению шкалы, следует, что в шкале отношений имеют физический смысл не только разности, но и суммы величин.

5. Абсолютная шкала. При измерениях относительных величин (отношений одноименных величин: молярная доля содержания компонента, коэффициент мощности, коэффициент трения и м. др.) единица величины вводится естественным способом $[X]=1$. При этом уравнение шкалы принимает вид $X = x$. Такие шкалы, также являющиеся шкалами отношений, часто называют абсолютными. Для образования многих производных единиц системы СИ используются безразмерные и счетные единицы абсолютных шкал.

1.2. Понятие измерения, качественная и количественная характеристики физических величин

Понятие измерения как процесса познания окружающего мира с помощью качественного и количественного оценивания свойств объектов (явлений, процессов и т.п.) вытекает из теории познания – гносеологии,

которая является частью философии – матери всех наук. Однако это понятие развивается вместе с развитием науки. Так в соответствии с [2], как указано выше, под измерением понимается нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. В [3] измерение трактуется как процесс получения количественной информации о характеристиках свойств объектов и явлений опытным путем (экспериментально). Такая информация в отличие от теоретической называется измерительной. В [4] измерение – это совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном и неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Измерение можно рассматривать как познавательный процесс, которому присущ ряд аспектов, отражающих специфику измерений в отличие от других процессов познания:

1. Измеряемая физическая величина не может быть определена сама по себе, а только вместе с тем физическим объектом, в котором она проявляется.

2. В процессе измерения должна быть произведена селекция измеряемой физической величины при условии изменения других влияющих, но не информативных физических величин.

3. Для восприятия измеряемой физической величины и получения информации о её значении необходим обмен энергией между объектом измерения и средством измерения, причем вторжение средств измерения в объект не должно нарушать его свойств.

4. При измерении необходимо учитывать характер распределения измеряемой физической величины в пространстве объекта и во времени, ее связь с другими свойствами объекта и окружающими условиями.

5. Измеряемую величину воспринимают средства измерения,

преобразуя ее в другую физическую величину — измерительный сигнал, удобный для преобразования, передачи, сравнения, представления и хранения результата измерения.

6. Измерение обязательно предполагает сравнение измеряемой физической величины или величины, в которую преобразована измеряемая величина, с единицами измерений (последние реализованы либо с помощью мер, либо в виде шкал).

7. При измерении составляются цепи измерительных преобразований, т. е. измерительные цепи, сочетания которых в различной совокупности представляют методы измерений.

8. При оценке погрешностей результата измерения необходимо учитывать перечисленные выше особенности измерительного процесса (помимо погрешностей средств измерения), от которых зависит его значение, и субъективные погрешности оператора.

9. Форма представления измеряемой величины может быть разнообразной и должна быть удобной для восприятия человеком или машиной при измерении, контроле или идентификации.

Выделение, исследование, систематизация и теоретическое обобщение перечисленных аспектов измерительных процессов составляют основу теории информационно-измерительной техники.

Качественной характеристикой измеряемых величин является их **размерность**. Формализованная размерность обозначается символом *dim*, происходящим от слова *dimension*, которое в зависимости от контекста может переводиться и как размер, и как размерность.

Размерность основных физических величин обозначается соответствующими заглавными буквами. Для длины, массы и времени, например, $dim l = L$; $dim m = M$; $dim t = T$.

При определении размерности производных величин руководствуются следующими правилами:

1. Размерности левой и правой частей уравнений не могут не совпадать, так как сравниваться между собой могут только одинаковые свойства. Объединяя левые и правые части уравнения, можно прийти к выводу, что алгебраически суммироваться могут только величины, имеющие одинаковые размерности.

2. Алгебра размерности мультипликативна, т.е. состоит из одного единственного действия - умножения:

- размерность произведения нескольких величин равна произведению их размерностей. Так, если зависимость между величинами X, A, B, C имеет вид $X = A \cdot B \cdot C$, то $\dim X = \dim (A \cdot B \cdot C) = \dim A \cdot \dim B \cdot \dim C$;

- размерность частного при делении одной величины на другую равна отношению их размерностей, т.е. если $X = A/B$, то $\dim X = \dim (A/B) = \dim A / \dim B$;

- размерность любой величины, возведенной в некоторую степень, равна её размерности в той же степени. Так, если $X = A^n$, то $\dim X = \dim (A^n) = (\dim A)^n$.

Пример 1. Требуется образовать производные единицы скорости, силы, давления.

Решение:

1. Так как скорость определяется соотношением $V = S/t$, то $\dim V = \dim S / \dim t = L / t = LT^{-1}$.
2. Так как по второму закону Ньютона сила равна $F = m \cdot a$, где $a = V/t$ - ускорение тела, то $\dim F = \dim m \cdot \dim a = ML/T^2 = MLT^{-2}$. Если принять размерность массы – кг, размерность длины – м, размерность времени – с, то размерность силы $\dim F = \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$. Такая единица называется ньютон (Н).
3. Давление p определяется силой, действующей при равномерной нагрузке на единицу поверхности. Поэтому $p = F/s$, следовательно $\dim p = \dim F / \dim s = MLT^{-2} / L^2 = ML^{-1}T^{-2}$. Если принять размерность массы – кг, размерность длины – м, размерность времени – с, то

размерность давления $\dim p = \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$. Такая единица называется паскаль (Па).

Таким образом, всегда можно выразить размерность производной физической величины через размерности основных физических величин с помощью степенного одночлена

$$X = L^\alpha M^\beta T^\gamma \dots,$$

где $L, M, T \dots$ - размерности соответствующих основных физических величин: $\alpha, \beta, \gamma \dots$ - показатели размерности.

Каждый из показателей размерности может быть положительным или отрицательным, целым или дробным числом, нулем. Если все показатели размерности равны нулю, то такая величина называется *безразмерной*. Она может быть *относительной*, определяемой как отношение одноименных величин (например, относительная диэлектрическая проницаемость), и *логарифмической*, определяемой как логарифм относительной величины (например, логарифм отношения мощностей или напряжений).

Итак, размерность является качественной характеристикой измеряемой величины. Она отражает её связь с основными величинами и зависит от выбора последних. Как указывал М.Планк, вопрос «об истинной размерности любой величины имеет не более смысла, чем вопрос об истинном названии какого-либо предмета». Поэтому в гуманитарных науках, искусстве, спорте, квалитметрии, где полная номенклатура основных величин еще не определена, теория размерности не находит пока эффективного применения. В физике, напротив, методами теории размерностей нередко удается получать важные самостоятельные результаты. Формальное применение алгебры размерностей иногда позволяет определить неизвестную зависимость между физическими величинами.

Пример 2. В результате наблюдений установлено, что при движении по окружности сила F , прижимающая тело к опоре (рис.1.2), в какой-то степени зависит от его скорости v , массы m и радиуса окружности r : $F = m^\alpha \cdot v^\beta \cdot r^\gamma$.

Требуется определить вид этой зависимости.

Решение. На основании алгебры размерностей: $\dim F = \dim (m^\alpha \cdot v^\beta \cdot r^\gamma) = \dim^\alpha m \cdot \dim^\beta v \cdot \dim^\gamma r$, но $\dim F = MLT^{-2}$, $\dim m = M$, $\dim v = LT^{-1}$, $\dim r = L$. Отсюда $MLT^{-2} = M^\alpha (LT^{-1})^\beta L^\gamma = M^\alpha L^{\beta+\gamma} T^{-\beta}$. Следовательно, показатели размерности удовлетворяют уравнениям $\beta + \gamma = 1$; $\alpha = 1$; $-\beta = -2$; решение которых: $\alpha = 1$; $\beta = 2$; $\gamma = -1$. Таким образом $F = \frac{mv^2}{r}$.

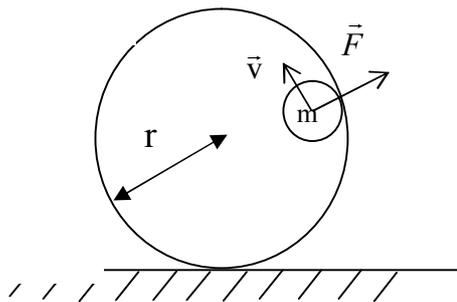


Рис.1.2. Иллюстрация примера 2

К выводу этой зависимости на основе законов механики был близок Галилей, но первым ее установил Гюйгенс.

Пример 3. Маятник характеризуется двумя величинами: массой m и длиной l . Колебания маятника совершаются под действием силы тяжести P . Следовательно, период колебаний τ может зависеть только от этих трех величин и является функцией вида: $\tau = C \cdot m^\alpha \cdot l^\beta \cdot P^\gamma$ (рис.1.3) Требуется определить вид этой зависимости.

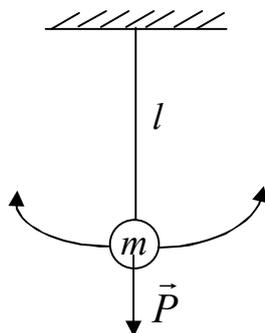


Рис.1.3. Иллюстрация примера 3

Решение. Запишем условие равенства размерностей левой и правой частей уравнения. Так как $\dim \tau = T$, $\dim m = M$, $\dim l = L$, $\dim P = MLT^{-2}$, то

$T=M^{\alpha}L^{\beta}(MLT^{-2})^{\gamma}$ или $T=M^{\alpha+\gamma}L^{\beta+\gamma}T^{-2\gamma}$. Сравнивая соответствующие показатели размерностей левой и правой частей этого равенства, получаем систему уравнений: $\alpha + \gamma = 0$; $\beta + \gamma = 0$; $-2\gamma = 1$; решение которых : $\alpha = 1/2$; $\beta = 1/2$; $\gamma = 1/2$. Подставив найденные значения показателей размерности в исходное уравнение, получим

$$\tau = C \cdot m^{1/2} \cdot l^{1/2} \cdot P^{1/2} = C \sqrt{\frac{lm}{P}}, \text{ так как сила тяжести } P=mg, \text{ то } \tau = C \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Теория размерностей повсеместно применяется для оперативной проверки правильности сложных формул. Если размерности левой и правой частей уравнения не совпадают, т.е. не выполняется правило 1, то в выводе формулы, к какой бы области она не относилась, следует искать ошибку.

Количественной характеристикой измеряемых величин служит их **размер**. Получение информации о размере физической или нефизической величины является содержанием любого измерения.

Размер является объективной количественной характеристикой, не зависящей от выбора единиц измерения. Например, 1000 мм; 100 см; 1 м; 0,001 км – четыре варианта представления одного и того же размера. Каждый из них является значением физической величины (в данном случае длины) – выражением размера в тех или иных единицах измерения.

Значение можно представить в виде произведения (1.2), где x - отвлеченное число, называемое числовым значением, а $[X]$ – размер единицы измерения. Из приведенных примеров видно, что значение, как и размер, от выбора единиц не зависит, в отличие от числового значения. Для одного и того же размера числовое значение тем меньше, чем больше единица измерения (и наоборот), так что произведение в правой части уравнения остается постоянным.

Из-за зависимости числовых значений от размера единиц роль последних очень велика. Если допустить произвол в выборе единиц, то результаты измерений окажутся несопоставимы между собой, то есть нарушится единство измерений. Чтобы этого не произошло, единицы

измерений устанавливаются по определенным правилам и закрепляются законодательным путем. Наличие законодательной метрологии отличает эту науку от других естественных наук (физики, химии и т.д.) и направлено на обеспечение единства измерений.

1.3. Международная система единиц (система СИ). Воспроизведение и передача размера единиц. Эталоны единиц системы СИ

Единая международная система единиц (система СИ) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. Эта система является логическим завершением развития предшествующих ей систем единиц [4,5] и отличается от них следующими достоинствами:

- универсальность, т. е. охват всех областей науки и техники;
- унификация всех областей и видов измерений;
- когерентность величин (под когерентностью понимается скоррелированность или согласованность величин);
- возможность воспроизведения единиц с высокой точностью в соответствии с их определением;
- упрощение записи формул в физике, химии, а также в технических науках в связи с отсутствием переводных коэффициентов;
- уменьшение числа допускаемых единиц;
- единая система образования кратных и дольных единиц, имеющих собственные наименования;
- облегчение педагогического процесса в средней и высшей школах, так как отпадает необходимость в изучении множества систем единиц и внесистемных единиц;
- лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и

экономических связей между различными странами.

В системе единиц физических величин различают **основные** и **производные** единицы. Произвольно выбранные единицы измерения, на основе которых построена данная система единиц, называются основными. Все остальные единицы, которые выражаются через основные по математическим зависимостям между соответствующими физическими величинами, называются производными.

В качестве единиц основных величин в системе СИ приняты метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела, моль, а также радиан и стерадиан [6].

Единица длины. В 1983 г. на XVIII Генеральной конференции по мерам и весам было принято определение метра. По этому определению единица длины – метр – представляет собой расстояние, проходимое светом за $1/299792458$ долю секунды. Введению такого определения способствовало внедрение в эталонную технику лазеров. При этом размер единицы длины не изменился. Основными нововведениями были: переход от крeптоновой лампы к лазерному излучению в источнике света на эталонных установках; использование в качестве основного постулата постоянство скорости света $c = 2,997925 \cdot 10^8$ м/с; объединение в одном эталоне воспроизведения размера трех величин: длины, времени и частоты; использование в эталоне источников света на пяти различных длинах волн.

Для воспроизведения единицы длины используется интерферометр Майкельсона. В интерферометре входящий световой пучок расщепляется на два, направленных по разным путям. На выходе световые пучки сходятся.

В зависимости от разности оптических длин пройденных путей можно определить разность хода:

$$\Delta = (n - 1)l ,$$

где n – показатель преломления среды; l – геометрическая длина пути.

Условие максимума интерференционной картины:

$$\Delta = l_1 - l_2 = k\lambda,$$

где λ – длина волны лазера.

$$\text{Условие минимума: } \Delta = l_1 - l_2 = (2k - 1)\lambda/2.$$

Единица массы. В качестве основной механической единицы XI Генеральной конференцией по мерам и весам была утверждена единица массы – килограмм – масса вещества, равная массе прототипа килограмма.

Прототип килограмма находится в Международном бюро по мерам и весам в Севре под Парижем. Он представляет собой цилиндр из сплава 90 % платины и 10 % иридия диаметром 39 мм и такой же высоты.

Для обеспечения единства измерений массы было изготовлено большое количество прототипов массы. Точность изготовления прототипов обеспечена на уровне 10^{-8} относительной погрешности. Прототипы аттестованы в Международном бюро по мерам и весам. В Россию в 1889 г. был направлен прототип № 12, который хранится во Всероссийском НИИ метрологии им. Д. И. Менделеева в Санкт - Петербурге.

По определению первоначально прототип массы должен был совпадать с массой одного кубического дециметра воды при ее наибольшей плотности при температуре 3,98 °С и давлении 101 325 Па. Однако было определено, что максимальная плотность воды равна 0,999972 г/см³, т.е. прототип массы оказался на 28 мкг больше.

Единица времени. Измерение времени человек естественно связывает с движением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца. Так, продолжительность суток разбивается на часы, минуты, секунды:
 $t = 24 \cdot 60 \cdot 60 = 86\,400 \text{ с}.$

Однако продолжительность суток в разное время года различная, поскольку Земля движется вокруг Солнца по эллиптической орбите.

Международным бюро по мерам и весам в 1956 г. было принято определение так называемой эфемеридной секунды: $1 \text{ с} = (1/31556925,9747)$ тропического года 1900.

Тропический год составляет 365,24220 средних солнечных суток. Продолжительность тропического года превышает целое число суток примерно на четверть. Поэтому каждый четвертый год становится високосным.

Такое определение сохранялось до тех пор, пока не встала проблема определения единицы времени с относительной погрешностью не хуже 10 %.

В 1967 г. Международный комитет по мерам и весам принял новое определение единицы времени. Единица времени – секунда – равна продолжительности $9,192631770 \cdot 10^9$ колебаний излучения при квантовом переходе между линиями сверхтонкой структуры атома цезия ^{133}Cs , соответствующих переходу $(F = 4; m_F = 0) \rightarrow (F = 3; m_F = 0)$ основного состояния $^2S_{1/2}$.

Эталон единицы времени реализован на установке для наблюдения резонанса в атомном цезиевом пучке – установке для воспроизведения единицы частоты системы СИ – герц. Зафиксировав резонанс атомного пучка на частоте $9\,192\,631\,770$ Гц, эталон воспроизводит единицу времени – секунду с погрешностью СКО $\sigma = 10^{-14}$ относительных единиц.

Единица силы тока. Введение произвольной электрической единицы в практику измерений впервые было предложено на Международном конгрессе электриков в Чикаго в 1893 г. Было предложено ввести две абсолютные практические единицы электрических величин: один вольт и один ампер для измерения напряжения (разности потенциалов) и силы постоянного электрического тока. На практике силу постоянного электрического тока определяли по тем действиям, которые он оказывал на окружающую среду.

Ампер – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового сечения, расположенным на расстоянии

1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на участке длиной 1 м.

В 1948 г. в основу эталона ампера были положены токовые весы. Последние представляют собой рычажные равноплечие весы, в которых подвешенная подвижная катушка уравнивается грузом. Подвижная катушка входит в неподвижную коаксиально расположенную катушку. При прохождении по этим последовательно соединенным катушкам постоянного электрического тока подвижная катушка опускается. Для достижения равновесия на противоположное плечо необходимо положить груз. По его массе и судят о силе электрического тока. Погрешность такого эталона не превышает 10^{-3} %.

Введение в метрологическую практику эталона вольта на основе эффекта Джозефсона и эталона ома на основе эффекта Холла позволило повысить точность воспроизведения тока на два порядка. Современный эталон ампера состоит из двух комплексов:

- комплекс для установления размера ампера через вольт и ом с использованием эффекта Джозефсона и эффекта Холла, который включает в себя меру напряжения, меру электрического сопротивления, сверхпроводящий компаратор тока и регулируемые источники тока;
- комплекс для установления размера ампера через фарад, вольт, секунду включает в себя блок с набором мер постоянной емкости, интегратор, измерительный блок с частотомером, цифровым вольтметром и компаратором.

Эталон обеспечивает воспроизведение единицы силы тока со средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $5 \cdot 10^{-8}$ А при номинальном значении силы тока 1 А, и систематической погрешностью, не превышающей $2 \cdot 10^{-8}$ А при номинальном значении силы тока $1 \cdot 10^{-3}$ А.

Единица термодинамической температуры.

Термодинамическая температура является универсальной физической величиной. Она характеризует состояние многих физических тел и процессов.

Единица термодинамической температуры – Кельвин определяется как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды.

На эталонном уровне строится шкала термодинамической температуры, при этом используются температуры плавления и затвердевания чистых веществ.

Тройная точка воды – это такое состояние чистой воды, когда лед, жидкая вода и водяной пар находятся в тепловом равновесии. В условиях вакуума над тающим льдом устанавливается равновесное давление водяного пара $p = 611$ Па. Этому состоянию приписано значение термодинамической температуры $T = 273,16$ К. Точка замерзания воды при нормальном атмосферном давлении $p = 101\,325$ Па = 1 атм расположена ниже тройной точки воды на $0,00993$ К.

XIII Генеральная ассамблея по мерам и весам в 1967 г. наряду с абсолютной термодинамической шкалой утвердила в качестве производной шкалу Цельсия, определив температуру как $t^{\circ}C = (T - 273,15)K$. В 1990 г. был утвержден последний состав Международной температурной шкалы (МТШ-90). Реперные точки МТШ-90 подразделяются на определяющие и вторичные. Список определяющих реперных точек приведен в табл. 1.1.

Определяющие реперные точки – это точки температурной шкалы, для которых результаты измерений в разных странах совпали между собой.

Вторичные реперные точки охватывают более широкий диапазон температур. Шкала вторичных реперных точек содержит 27 значений.

Самая высокая температура – температура затвердевания вольфрама – 3666 К.

На практике для точных измерений температуры используются платиновые термометры сопротивления или термопары, которые градуируются по реперным точкам. От платиновых термометров

сопротивления и терморпар размер единицы температуры передается образцовым и рабочим термометрам менее высокого класса точности.

Таблица 1.1

Реперные точки Международной температурной шкалы

Реперная точка	T, К	T, °С	Погрешность, К
Тройная точка равновесного Н ₂	13,803	- 259,346	0,005
Точка кипения равновесного Н ₂	17,042	- 256,108	0,005
Тройная точка:			
неона	24,5561	-248,5939	0,005
кислорода	54,3384	-218,7916	0,005
аргона	83,8058	-189,3442	0,005
ртути	234,3156	-38,8344	0,005
воды	273,16	0,01	0,0 (по опред.)
Точка плавления галлия	302,9146	29,7646	0,0015
Точка затвердевания:			
индия	429,7485	156,5985	0,015
цинка	692,677	231,928	0,003
алюминия	933,473	660,323	0,003
серебра	1234,93	961,78	0,005
золота	1337,33	1064,18	0,015
меди	1357,77	1084,62	0,02

Единица силы света. В 1967 г. XIII Генеральная ассамблея по мерам и весам утвердила единицу силы света – канделу.

Кандела – сила света в направлении нормали к отверстию абсолютно черного тела, имеющего температуру затвердевания платины $T = 2045$ К и площадь $1/60$ см² при давлении 101325 Па.

Ранее эталон единицы силы света представлял собой комплекс, в котором платина, расплавленная индукционной печью, нагревает керамическую трубку диаметром 2 мм и длиной 40 мм. Излучение из трубки фокусируется на вход фотометра, который позволяет производить измерение энергии излучения на различных длинах волн. Такая структура имеет существенные источники погрешности: невозможно создать идеальный черный излучатель, поэтому коэффициент излучения всегда меньше единицы; температура излучающей полости несколько ниже температуры платины вследствие теплопроводности и неоднородности затвердевания платины; в оптической системе теряется часть световой энергии. Введение поправок делает возможным воспроизведение единицы силы света с точностью 0,1 - 0,2 %.

В настоящее время воспроизведение единицы силы света с точностью 0,1 % возможно с помощью источника (чаще всего используется вольфрамовая ленточная лампа накаливания, которая подбором силы тока излучает как черное тело с температурой 2045 К) и фотоприемника, рассчитанного на измерение энергетической мощности излучения на длине волны 555 нм. Измерения ведутся в единицах механической мощности – ваттах, а световой поток определяется через механический эквивалент света, равный 683 люмена на ватт (люмен – единица измерения светового потока).

Единица количества вещества. Для удобства описания химических процессов в систему СИ введена химическая основная единица – моль.

Моль – количество вещества, имеющее столько структурных единиц, сколько их содержится в 12 г моноизотопа углерода C^{12} (точно это значение не установлено).

По физическому смыслу оно равно постоянной Авогадро – числу атомов в грамм-эквиваленте углерода.

Эта величина дублирует основную единицу массы – килограмм. Необходимо также отметить, что до сих пор не существует реализации

эталона этой единицы. Многочисленные попытки независимого воспроизведения моля приводили к тому, что накопление точно измеренного количества вещества сводилось к необходимости выхода на другие эталоны физических величин. Например, попытка электрохимического выделения какого-либо вещества приводит к необходимости измерения массы и силы электрического тока, точное измерение числа атомов в кристаллах – к измерению линейных размеров кристалла и его массы и т.д.

Наличие эталонов основных единиц, во-первых, даёт воспроизведение с наивысшей точностью производных единиц, т.е. единиц, полученных на основе физических закономерностей, и, во-вторых, лежит в основе обеспечения единства измерений. Под единством измерений понимается характеристика качества измерений, заключающаяся в том, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы. На достижение и поддержание на должном уровне единства измерений направлена деятельность государственных и ведомственных метрологических служб, проводимая в соответствии с установленными законами, нормами, требованиями и правилами. На государственном уровне деятельность по обеспечению единства измерений регламентируется Законом о единстве измерений [7] и стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ).

Производные единицы СИ образуют из основных по правилам образования когерентных производных единиц.

Восемнадцать производным единицам СИ Генеральной конвенцией по мерам и весам присвоены специальные, обязательные к применению наименования, причем шестнадцать названы в честь ученых (табл. 1.2).

Несмотря на определенные преимущества, которые дает применение единиц, определяемых той или иной системой, до настоящего времени широко распространены различные единицы, не укладывающиеся ни в одну

из систем. Если единица физической величины не входит ни в одну из общепринятых систем единиц, то она является **внесистемной**. Число внесистемных единиц довольно велико, и от многих из них нельзя отказаться в связи с удобством их применения в определенных областях, остальные сохранились в силу исторических традиций.

Так, исторически возникла единица давления – атмосфера, равная давлению, производимому силой 1 кгс на площадь 1 см², так как "атмосфера" близка по размеру к среднему давлению атмосферного воздуха на уровне моря. Другими примерами внесистемных единиц являются ангстрем, градус Цельсия, калория, литр, центнер и т.д.

Следующую группу внесистемных единиц образуют единицы, построенные из основных единиц не по десятичному принципу. К ним, в первую очередь, относятся такие распространенные единицы времени, как минута и час.

Последнюю группу образуют единицы, не связанные с какой-либо системой. Сюда входят все устаревшие национальные единицы.

Наравне с единицами СИ допускается применять **кратные** и **дольные** от них и их сочетания с единицами СИ. Кратной называют единицу, в целое число раз большую системной или внесистемной единицы. Дольной единицей называют единицу, в целое число раз меньшую системной или внесистемной единицы. Кратные и дольные единицы от единиц общепринятой системы не являются единицами этой системы. В табл. 1.3 приведены множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования. Эти приставки называют приставками СИ.

Производные единицы СИ, имеющие специальные наименования

Наименование физической величины	Наименование единицы	Обозначение единицы
Частота	герц	Гц
Сила, вес	ньютон	Н
Давление, механическое напряжение, модуль упругости	паскаль	Па
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж
Мощность, поток энергии	ватт	Вт
Электрический заряд (количество электричества)	кулон	Кл
Электрическое напряжение, электрический потенциал, электродвижущая сила	вольт	В
Электрическая емкость	фарад	Ф
Электрическое сопротивление	ом	Ом
Электрическая проводимость	сименс	См
Поток магнитной индукции, магнитный поток	вебер	Вб
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	тесла	Тл
Индуктивность, взаимная индуктивность	генри	Гн
Световой поток	люмен	лм
Освещенность	люкс	лк
Активность нуклида в радиоактивном источнике	беккерель	Бк
Поглощенная доза излучения	грэй	Гр
Эквивалентная доза излучения	зиверт	Зв

Наименования и обозначения приставок СИ

Кратные приставки			Дольные приставки		
наимен. приставки	обозначен. приставки (русское)	множитель	наимен. приставки	обозначен. приставки (русское)	множитель
экса	Э	10^{18}	деци	д	10^{-1}
пета	П	10^{15}	санτι	с	10^{-2}
тера	Т	10^{12}	милли	м	10^{-3}
гига	Г	10^9	микро	мк	10^{-6}
мега	М	10^6	нано	н	10^{-9}
кило	к	10^3	пико	п	10^{-12}
гекто	г	10^2	фемто	ф	10^{-15}
дека	да	10^1	атто	а	10^{-18}

Главными метрологическими операциями по обеспечению единства измерений являются воспроизведение, передача размера и хранение единиц измерений.

Воспроизведение единицы физической величины — это совокупность операций по материализации единицы физической величины (ФВ) с наивысшей точностью посредством государственного эталона или исходного образцового СИ. Различают воспроизведение основной и производной единиц.

Воспроизведение основной единицы — это воспроизведение единицы путем создания фиксированной по размеру ФВ в соответствии с определением единицы. Оно осуществляется с помощью государственных первичных эталонов.

Воспроизведение производной единицы — это определение значения ФВ в указанных единицах на основании косвенных измерений других

величин, функционально связанных с измеряемой. Так, воспроизведение единицы силы — ньютона — осуществляется на основании известного уравнения механики $F=mg$, где m — масса; g — ускорение свободного падения.

Передача размера единицы — это приведение размера единицы, хранимой поверяемым средством измерений, к размеру единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при поверке или калибровке. Размер единицы передается "сверху вниз" — от более точных СИ к менее точным.

Хранение единицы — совокупность операций, обеспечивающих неизменность во времени размера единицы, присущего данному СИ. Хранение эталона единицы ФВ предполагает проведение взаимосвязанных операций, позволяющих поддерживать метрологические характеристики эталона в установленных пределах. При хранении первичного эталона выполняются регулярные его исследования, включая сличения с национальными эталонами других стран с целью повышения точности воспроизведения единицы и совершенствования методов передачи ее размера.

Эталон — средство измерений (или комплекс СИ), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИ и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке. Классификацию, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливает ГОСТ 8.057—80.

Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя взаимосвязанными свойствами: *неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью*.

Неизменность — свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени.

Воспроизводимость — возможность воспроизведения единицы ФВ (на основе ее теоретического определения) с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается

путем постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Сличаемость — возможность сличения с эталоном других СИ, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующей техники измерения.

Различают следующие виды эталонов [3].

• **Первичный эталон** — обеспечивает хранение и воспроизведение с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами) точностью. Первичные эталоны — это уникальные СИ, часто представляющие собой сложнейшие измерительные комплексы, созданные с учетом новейших достижений науки и техники. Они составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений.

Первичный эталон может быть представлен как

- **международный** — эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами;

- **государственный или национальный** — это первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны. Государственные эталоны создаются, хранятся и применяются центральными метрологическими научными институтами страны. Термин "национальный эталон" применяется в случаях проведения сличения эталонов, принадлежащих отдельным государствам, с международным эталоном или при проведении так называемых круговых сличений эталонов ряда стран

• **Вторичный эталон** — хранит размер единицы, полученной путем сличения с первичным эталоном соответствующей ФВ. Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров, создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо

для организации поверочных работ, а также для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона.

• Вторичные эталоны делятся на

- **эталон сравнения** – применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом;
- **эталон – свидетель** – предназначен для проверки сохранности и неизменности первичного или государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты;
- **рабочий эталон** – применяется для передачи размера единицы рабочим средствам измерений. Это самые распространенные эталоны. С целью повышения точности измерений ФВ рабочие эталоны применяются во многих территориальных метрологических органах и лабораториях министерств и ведомств.

Способы выражения погрешности эталонов устанавливает ГОСТ 8.381—80. Погрешности государственных первичных и специальных эталонов характеризуются неисключенной систематической погрешностью, случайной погрешностью и нестабильностью. Неисключенная систематическая погрешность описывается границами, в которых она находится. Случайная погрешность определяется средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений при воспроизведении единицы с указанием числа независимых измерений. Нестабильность эталона задается изменением размера единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, за определенный промежуток времени.

Обеспечение правильной передачи размера единиц ФВ во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем. **Поверочная схема** — это нормативный документ, который устанавливает соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим СИ с указанием методов и погрешности, утвержденный в установленном порядке.

Основные положения о поверочных схемах приведены в ГОСТ 8.061—80. Поверочные схемы делятся на государственные и локальные.

Государственная поверочная схема распространяется на все СИ данной ФВ, имеющиеся в стране. Она разрабатывается в виде государственного стандарта, состоящего из чертежа поверочной схемы и текстовой части, содержащей пояснения к чертежу.

Локальная поверочная схема распространяется на СИ данной ФВ, применяемые в данном регионе, отрасли, ведомстве или на отдельном предприятии (организации).

Локальные поверочные схемы не должны противоречить государственным поверочным схемам для СИ одних и тех же ФВ. Они могут быть составлены при отсутствии государственной поверочной схемы. В них допускается указывать конкретные типы (экземпляры) СИ. Локальные поверочные схемы оформляют в виде чертежа, элементы которого приведены на рис. 1.4.

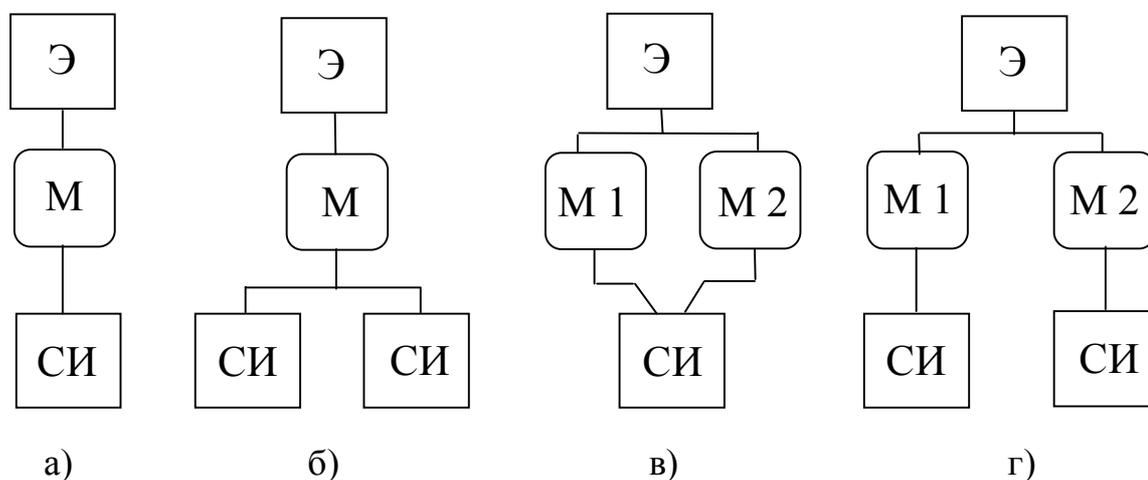


Рис. 1.4. Элементы графического изображения поверочных схем при передаче размера: Э – эталон; М – метод передачи размера физической величины; СИ – рабочие средства измерения

Поверочная схема устанавливает передачу размера единиц одной или нескольких взаимосвязанных величин. Она должна включать не менее двух ступеней передачи размера. Поверочную схему для СИ одной и той же величины, существенно отличающуюся по диапазонам измерений, условиям применения и методам поверки, а также для СИ нескольких ФВ, допускается подразделять на части.

На чертежах поверочной схемы должны быть указаны:

- наименования СИ и методов передачи размера единиц физических величин;
 - номинальные значения ФВ или их диапазоны;
 - допускаемые значения погрешностей СИ;
 - допускаемые значения погрешностей методов передачи размера единиц физических величин.
- Правила расчета параметров поверочных схем и оформление чертежей поверочных схем приведены в ГОСТ 8.061—80 и в рекомендациях МИ 83—76.

Глава 2. Общие сведения об измерениях физических величин

2.1. Классификация и области измерений

Измерения можно систематизировать по нескольким признакам, наиболее важные из которых представлены в табл.2.1.

Таблица 2.1

Классификация измерений

<i>Признак классификации измерений</i>	<i>Классификация измерений</i>
1. По цели	1.1. Метрологические 1.2. Технические
2. По наличию предварительного преобразования	2.1. Непосредственные 2.2. С предварительным преобразованием
3. По размерности измеряемых величин	3.1. Абсолютные 3.2. Относительные
4. По количеству одновременно измеряемых величин	4.1. Одномерные 4.2. Многомерные
5. По точности и условиям измерения	5.1. Равноточные 5.2. Неравноточные
6. По количеству каналов измерения	6.1. Одноканальные 6.2. Многоканальные
7. По количеству уравнений связи между измеряемыми величинами и результатом измерения	7.1. Прямые 7.2. Косвенные 7.3. Совокупные 7.4. Совместные
8. По количеству операций измерения	8.1. Однократные 8.2. Многоканальные
9. По соотношению числа уравнений связи и числа измеряемых величин	9.1. Безызбыточные 9.2. Избыточные
10. По способу введения избыточности	10.1. Многократные 10.2. Однократные
11. По характеристике качества измерений	11.1. Правильные 11.2. Воспроизводимые 11.3. Сходимые
12. По характеру изменения измеряемых величин во времени	12.1. Статические 12.2. Динамические 12.3. Измерения случайных величин и процессов

Следует пояснить некоторые неочевидные признаки классификации измерений.

Метрологические измерения – измерения с целью обеспечения единства и требуемой точности технических измерений. К ним относятся:

- воспроизведение единиц и шкал физических величин первичными эталонами и передачу их размеров менее точным эталонам;
- поверка средств измерений (см.гл.2.2.);
- калибровка средств измерений (см.гл.2.2);
- другие метрологические измерения (сличение эталонов, уточнение физических констант, создание справочных данных о свойствах веществ и материалов и т.п.).

Технические измерения осуществляются с целью получения информации о свойствах материальных объектов, процессов и явлений окружающего мира. Их выполняют, например, для контроля и управления технологическими процессами, проведения научных экспериментов, диагностики состояний технических объектов, окружающей среды и в медицине. Эти измерения связаны с метрологическими измерениями и, благодаря им, развиваются и совершенствуются.

По размерности используемых единиц различают **абсолютные измерения**, которые основаны на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений фундаментальных физических констант, и **относительные измерения**, в которых определяется отношение величины к однородной величине, играющей роль единицы [1].

Под **равноточными измерениями** понимают такие измерения какой-либо величины, которые выполнены одинаковыми по точности средствами измерений в одних и тех же условиях. **Неравноточные измерения** величины осуществляются различными по точности средствами измерений и (или) в различных условиях [22].

Прямые измерения – это измерения, проведенные при помощи средства измерения, хранящего единицу или шкалу измеряемой величины.

Косвенными называются измерения, результат которых определяют на основании прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью. Например, скорость можно вычислить по результатам измерения пути и времени, электрическое сопротивление — по результатам измерения падения напряжения и силы тока и т. д.

Совокупными называют производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величины находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. Примером совокупных измерений является калибровка набора гирь при наличии равноплечих весов.

Совместные измерения отличаются от совокупных тем, что в них участвуют разноименные физические величины (ФВ).

При использовании современных средств вычислительной техники косвенные, совокупные и совместные измерения широко применяются в системах автоматического контроля. Однако по сравнению с прямыми измерениями их применение сопровождается накоплением погрешностей. Это каждый раз требует анализа конкретной измерительной задачи.

Под *правильными измерениями* понимают такие, характеристика качества которых отражает близость к нулю систематических погрешностей результатов измерений. *Воспроизводимые измерения* обеспечивают повторяемость (в пределах установленной погрешности) результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами, разными средствами, разными операторами в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям измерений (температуре, давлению, влажности и др.). *Сходимые измерения* отражают близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно одними и теми же средствами, методами, в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.

Характеристикой качества при воспроизводимых и сводимых измерениях может служить средняя квадратичная погрешность сравниваемых рядов измерений.

Под *областью измерений* понимается совокупность измерений физических величин, свойственных какой-либо области науки или техники и выделяющихся своей спецификой.

В настоящее время выделяют следующие области измерений:

- измерения пространственно-временных величин;
- механические измерения (в том числе измерения кинематических и динамических величин, механических свойств веществ и материалов, механических свойств и форм поверхностей);
 - измерения теплоты (термометрия, измерения тепловой энергии, теплофизических свойств веществ и материалов);
 - электрические и магнитные измерения (измерения электрических и магнитных полей, параметров электрических цепей, характеристик электромагнитных волн, электрических и магнитных свойств веществ и материалов);
 - аналитические (физико-химические) измерения;
 - оптические измерения (измерения величин физической оптики, когерентной и нелинейной оптики, оптических свойств веществ и материалов);
 - акустические измерения (измерения величин физической акустики и акустических свойств веществ и материалов);
 - измерения в атомной и ядерной физике (измерения ионизирующих излучений и радиоактивности, а также свойств атомов и молекул);
 - измерение параметров в нанотехнологиях.

2.2. Обеспечение единства измерений. Основные метрологические операции

В соответствии с Федеральным законом «Об обеспечении единства измерений» [8] под *единством измерений* понимается такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в установленных единицах величин, и погрешности (неопределенности) измерения не выходят за установленные границы, что соответствует ГОСТ 16263 – 70 [2]. Это понятие охватывает важнейшие задачи метрологии: унификация единиц в законодательном международном масштабе, разработка систем воспроизведения единиц (эталонов, мер, образцов), передачи их размеров техническим СИ (разработка поверочных схем), создание теоретического и прикладного подхода к анализу и оценки погрешностей результатов и средств измерений, развитие законодательной и прикладной метрологии с целью обеспечения единства измерений.

Обеспечение единства измерений – это деятельность метрологических и других служб, направленная на достижение единства измерений при требуемой точности результатов измерений. Она осуществляется через целую систему деятельности метрологических служб, осуществляющих обязательные (установленные законом [8]) метрологические операции.

Сюда относятся в первую очередь операции *государственного метрологического контроля и надзора*, под которыми понимается деятельность, осуществляемая федеральными органами исполнительной власти в целях проверки соблюдения установленных обязательных требований по обеспечению единства измерений.

Одним из видов государственного метрологического контроля и надзора является операция поверки. *Поверка* – совокупность операций, выполняемых с целью подтверждения действительных значений метрологических характеристик средств измерений установленным обязательным требованиям по обеспечению единства измерений.

Перечень СИ, подлежащих поверке, утверждается Правительством РФ.

В сферах деятельности, где государственный метрологический надзор и контроль не являются обязательными, для обеспечения метрологической исправности СИ применяется калибровка. **Калибровка** (*калибровочные работы*) — совокупность операций, выполняемых с целью определения действительных значений метрологических характеристик СИ.

Для проведения калибровочных работ создана **Российская система калибровки** (РСК) — совокупность субъектов деятельности и калибровочных работ, направленных на обеспечение единства измерений в сферах, не подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору и действующих на основе установленных требований к организации и проведению калибровочных работ.

В сферах действия государственного контроля и надзора СИ подвергаются обязательным испытаниям с последующим утверждением их типа.

Для СИ, не подлежащих государственному контролю и надзору, предусмотрены операции **метрологической аттестации** (МА), при которой осуществляется всестороннее исследование СИ с целью определения его метрологических свойств (диапазона измерений, чувствительности, погрешностей, условий применения и т.д.) и выдачи документа с указанием полученных данных (свидетельство о МА).

Следует подчеркнуть, что для подтверждения единства измерений используется также деятельность метрологических и других служб, связанная с метрологическим обеспечением измерений. Это деятельность, направленная на создание в стране необходимых эталонов, поверочных схем, технических СИ, методик выполнения измерений (МВИ) и разработку и установление метрологических правил и норм и т.п., выполнение которых обеспечивает качество измерений на объекте, процессе, предприятии и отрасли. Иначе говоря, метрологическое обеспечение СИ, АСУ ТП,

технологических процессов, предприятий, отраслей является обеспечением качества в каждом из перечисленных приложений.

2.3. Принципы, методы и методики выполнения измерений

Решение любой измерительной задачи реализуется с помощью средств измерений, основанных на различных физических явлениях или эффектах. Принципы измерений – это физическое явление или эффект, положенный в основу измерений тем или иным средством измерений. Например, зависимость размера активного сопротивления платинового проводника от температуры реализуется в платиновых термометрах электрического сопротивления. В термопарах термоэлектродвижущая сила зависит от разности температур сплавов разнородных металлов и разной работы выхода электронов этих разнородных металлов.

Для осуществления измерений (см. гл. 1.2.) необходимо использовать специальную совокупность приемов, определяющуюся понятием метода измерения. Это понятие трактуется различными школами в области метрологии по-разному. Так, в ГОСТ 16263-70 под методом измерений понимается «совокупность приемов использования принципов и средств измерений», а в МИ 2247-93 – «прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений».

Остановимся на понятии *метода измерений* как совокупности измерительных преобразований (измерительных цепей) для сравнения измеряемой физической величины с ее единицей или шкалой измерений.

В соответствии с таким определением все методы можно разделить на два класса:

- метод прямого преобразования, или метод непосредственной оценки;
- метод уравнивающего преобразования, или метод сравнения с мерой [2].

Классификация методов измерений приведена на рис. 2.1.

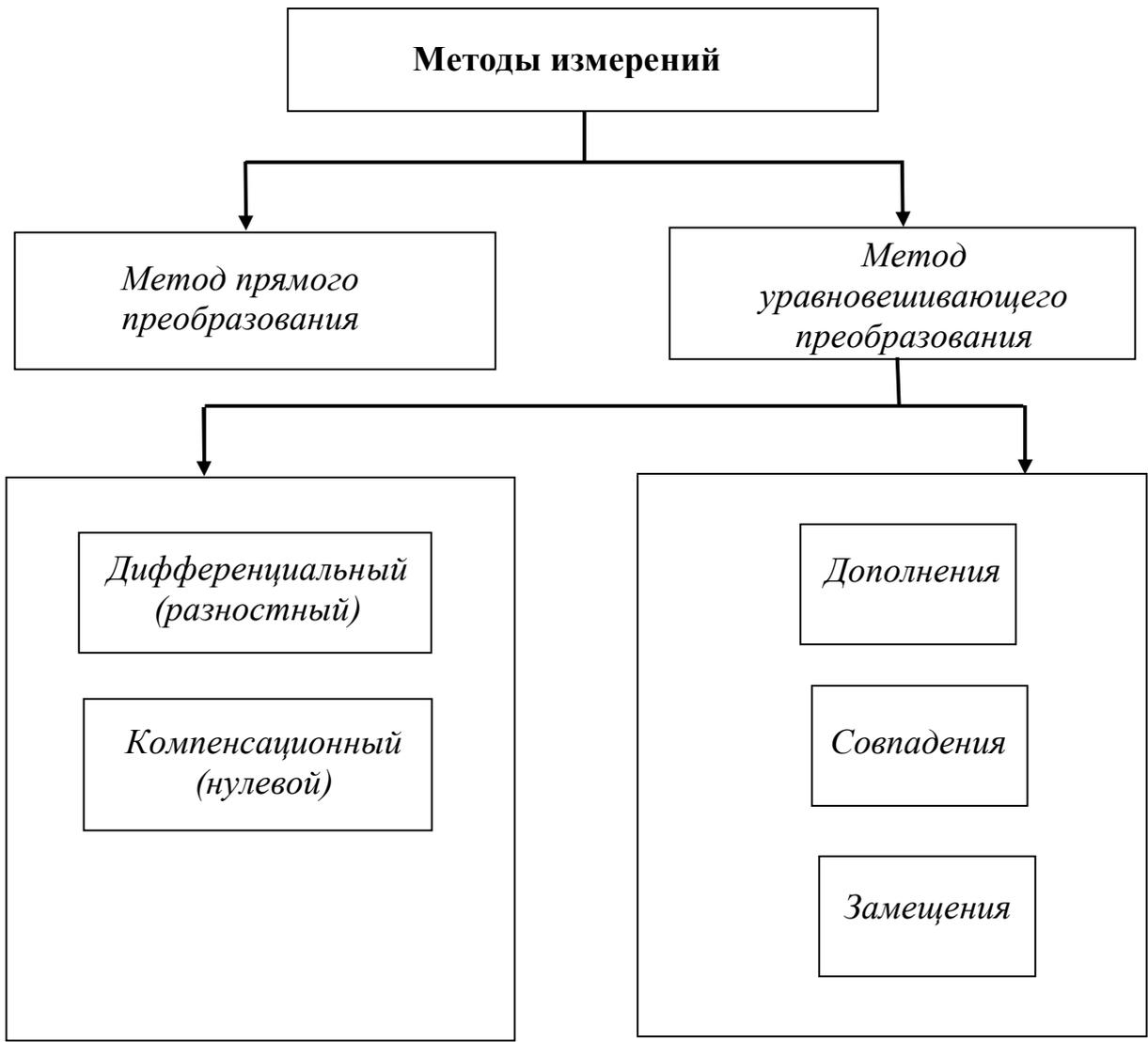


Рис. 2.1. Классификация методов измерения

Метод прямого преобразования по метрологической классификации позволяет значения измеряемой величины получить непосредственно по отсчетному устройству СИ. Однако этот признак метода не является исключительным, отличающим его от других методов, так как в СИ, в которых реализуются другие методы измерений, результат измерения измеряемой величины также осуществляется по отсчетному устройству, например, в мостах и потенциометрах. В методах прямого преобразования

также реализуется сравнение с мерой (единицами) измерений в виде шкалы опосредованно после калибровки (градуировки) СИ.

К приборам, осуществляющим этот метод измерения, относится большинство показывающих приборов различных электромеханических систем, механических приборов с упругими чувствительными элементами и т. д.

При прямом преобразовании приборы или измерительные преобразователи преобразовывают входную величину X в измерительные сигналы Y только в одном прямом направлении. Выходной измерительный сигнал в устройстве сравнения сравнивается со шкалой, которая заранее проградуирована в единицах входной измеряемой величины. В измерительных преобразователях на выходе получают измерительный сигнал Y , связанный с входной измеряемой величиной X известной функцией преобразования.

Реализация метода прямого преобразования представлена на рис.2.2.

Результирующая чувствительность всего прямого измерительного преобразования определяется произведением чувствительностей всех его составляющих преобразований (преобразователей), а суммарная погрешность в равной мере образуется погрешностями всех преобразований (преобразователей).

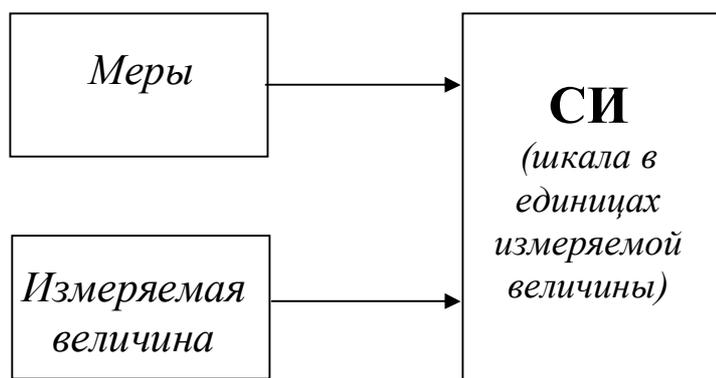


Рис.2.2. Реализация метода прямого преобразования

Метод уравнивающего преобразования (метод уравнивания) для технических измерений по способу сравнения с мерой можно разделить на две группы (рис.2.1):

- методы уравнивания, реализованные в СИ – метод дифференциальный или разностный и метод компенсационный или нулевой;
- методы уравнивания, осуществляемые в лабораторной и (или) метрологической практике – метод замещения, совпадения и дополнения.

Для метрологических задач часто используются и первая группа методов, в основном для тех измерений, где используются меры физических величин, и компараторы – СИ, предназначенные для сравнения с мерой.

Метод уравнивания – метод измерений, при котором физическая величина определяется суммой однородной величины, имеющей известное значение, и разности между измеряемой величиной и однородной известной величиной, преобразованными в результат измерения.

Если же разность незначительно отличается от размера измеряемой величины, этот метод уравнивания называется дифференциальным или разностным. Если же эта разность доводится до нуля с помощью переменной меры известной однородной величины, то этот метод называется компенсационным или нулевым.

Метод уравнивающего преобразования (метод уравнивания) в СИ характеризуется тем, что в измерительных устройствах используются две цепи преобразований: прямая и обратная (рис.2.3). Назначение цепи обратного преобразования заключается в том, чтобы, используя энергию выходного сигнала Y цепи прямого преобразования, создать уравнивающую величину X_β , однородную с измеряемой величиной X . В результате уравнивания $X - X_\beta = \Delta X$ на вход цепи прямого преобразования поступает только часть входной величины, которая преобразуется в выходной сигнал, сравниваемый со шкалой, проградуированной в единицах измеряемой величины.

В лабораторной и метрологической практике для уменьшения систематических погрешностей (см. гл. 4) используется метод замещения.

Метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают величиной, воспроизводимой мерой. Поскольку оба измерения проводятся одним и тем же прибором в одинаковых условиях, систематическая погрешность измерений может быть в значительной степени скомпенсирована.

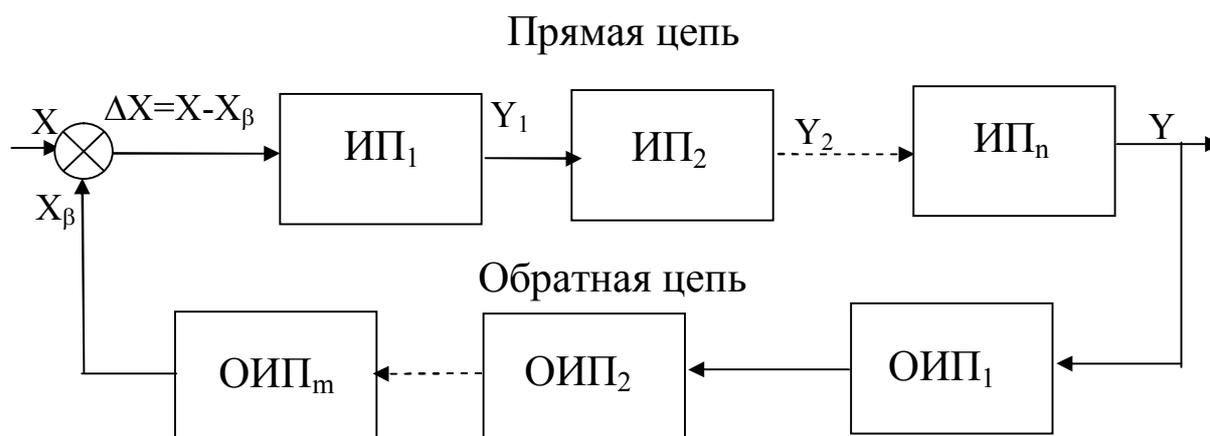


Рис.2.3. Реализация метода уравнивающего преобразования

В некоторых измерительных задачах удобно применение других разновидностей метода сравнения с мерой: метода дополнения и метода совпадений.

Метод дополнения – метод сравнения с мерой, в котором значение измеряемой величины дополняется мерой с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее известному значению.

Метод совпадений – метод измерений, при котором определяют разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

Кроме способов сравнения измеряемых величин с мерами, т.е. выбора методов измерений как технической реализации процесса измерений необходимо предусмотреть совокупность приемов использования выбранных

методов и СИ, - технологию выполнения измерений. Это определяется **методикой выполнения измерений (МВИ)**, которая представляет собой «установленную совокупность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение необходимых результатов измерений в соответствии с принятым методом и средствами измерений» [4].

При современном развитии измерительной техники в МВИ следует включать процедуру измерений, условия подготовки и проведения измерений, а также правила (алгоритмы) обработки и интерпретации полученных значений измеряемой физической величины с требуемой погрешностью. МВИ обязательно регламентируются нормативными документами, в которых оговариваются для некоторых (например аналитических измерений кроме перечисленных требований особенности отбора проб, их транспортировки, подготовки к измерению и в случае необходимости хранения) [10]. Типовые и частные МВИ должны быть разработаны создателями измерительных процедур и аттестованы органами государственного контроля и надзора или ведомственными метрологическими службами [11].

2.4. Общие сведения о средствах измерений

Средствами измерений (СИ) называют используемые при измерениях технические средства, имеющие нормированные метрологические свойства. В этом определении основную смысловую нагрузку, вскрывающую метрологическую суть средств измерений, несут слова «нормированные метрологические свойства».

Например, обычный трансформатор отличается от измерительного СИ тем, что измерительный имеет нормированные метрологические характеристики.

Наличие нормированных метрологических свойств означает, во-первых, что СИ способно хранить или воспроизводить единицу, шкалу измеряемой

величины или функцию ее преобразования в выходной сигнал, и, во-вторых, размер этой единицы остается неизменным в течение определенного времени. Если бы размер единицы был нестабильным, нельзя было бы гарантировать требуемую точность результата измерений. Отсюда следуют три вывода:

- измерять можно лишь тогда, когда техническое средство, предназначенное для этой цели, способно сохранять метрологические свойства достаточно стабильно (неизменно во времени);
- техническое средство непосредственно после изготовления еще не является СИ; оно становится таковым только после передачи ему единицы от другого, более точного СИ;
- необходимо периодически контролировать метрологические свойства СИ, и при необходимости восстанавливать его прежнее значение путем проведения поверки или калибровки (см.гл.2.2).

По назначению различают рабочие СИ, применяемые для проведения технических измерений, и метрологические, предназначенные для проведения метрологических измерений.

Технические СИ имеют различные назначения в реализации измерительных процедур.

Меры физических величин – это СИ, предназначенные для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых известны с необходимой точностью. Примерами мер являются штриховая мера длины, нормальный элемент (мера ЭДС с номинальным значением 1 В), кварцевый генератор (мера частоты электрических колебаний), источник микропотоков газов и паров (ампула с веществом, выделяющимся в газообразном виде, являющаяся мерой скорости преобразования в газ целевого вещества). Меры подразделяют на однозначные (мера, хранящая один размер величины, например, плоскопараллельная концевая мера длины или конденсатор постоянной емкости) и многозначные (мера, хранящая несколько размеров

величины, например, штриховая мера длины и конденсатор переменной емкости). В измерительной практике широко применяют не только отдельные меры, но и наборы мер (комплект мер разного размера одной и той же величины, например, набор плоскопараллельных концевых мер длины), а также магазины мер (набор мер, конструктивно объединенных в одно устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях, например, магазин электрических сопротивлений).

Воспроизводя или храня размер величины, которому присвоено определенное значение, мера тем самым хранит единицу этой величины. Иначе говоря, мера выступает в качестве носителя единицы величины и поэтому служит основой измерения.

Измерительные преобразователи (ИП) – это СИ, предназначенные для преобразования измеряемой величины в другую величину или сигнал измерительной информации, удобный для дальнейших преобразований, передачи, обработки, индикации или хранения. По расположению в измерительной цепи различают первичные и промежуточные ИП. Первичные преобразователи преобразуют измеряемую физическую величину в другую величину или сигнал. Остальные ИП называют промежуточными. Они расположены после первичного ИП и могут выполнять различные операции преобразования измерительных сигналов.

Главная функция преобразователей заключается в стабильности элементарного преобразования одного рода физической величины в другой.

Датчик (Д) – это СИ, состоящее из одного или нескольких измерительных преобразователей, включая первичный, оформленное в единое конструктивное целое и предназначенное для установки в объект исследования, имеющее нормированные метрологические характеристики.

Измерительные прибор – СИ, предназначенное для визуального получения значений измеряемой величины, т.е. имеющее шкалу физической величины в необходимом диапазоне и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Различают следующие виды измерительных приборов:

- аналоговые (выходной сигнал является непрерывной функцией измеряемой величины) и цифровые (выходной сигнал представлен в цифровом виде);
- показывающие (допускают только отсчитывание показаний) и регистрирующие (предусмотрена регистрация результатов измерений);
- суммирующие (показания функционально связаны с суммой двух или нескольких величин) и интегрирующие (значение измеряемой величины определяется путем ее интегрирования по другой величине);
- прямого действия (результат измерений снимается непосредственно с его устройства индикации) и сравнения (измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно, так называемые компараторы).

Например, микрометр и цифровой вольтметр относятся к показывающим измерительным приборам, барограф □ к регистрирующим, а амперметр, манометр, ртутно-стеклянный термометр – измерительные приборы прямого действия.

Примерами измерительных приборов сравнения – компараторов, являются: двухчашечные весы, интерференционный компаратор мер длины, мост электрического сопротивления, электроизмерительный потенциометр.

Совокупности СИ нередко объединяют в комплексы, называемые измерительными установками (или измерительными устройствами).

Измерительная установка □ совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких величин и расположенная в одном месте. Измерительную установку с включенными в нее эталонами называют поверочной или эталонной установкой, установку, предназначенную для испытаний какой-либо продукции, — испытательным стендом. Некоторые виды больших

измерительных установок называют измерительными машинами.

Информационно-измерительная система (ИИС) — совокупность средств измерения (датчиков, преобразователей, приборов и т.д.), вспомогательных устройств и вычислительных средств, позволяющих получать, преобразовывать, передавать, представлять и архивировать измерительную информацию, включая обработку измерительных сигналов по сложным алгоритмам и программам с использованием вычислительной техники. При применении интегрированных распределенных систем управления ИИС состоят из рядов измерительных каналов со сложной структурой их взаимодействия с локальными и центральными вычислительными комплексами. Они выполняют различные измерительные задачи: измерение, контроль, идентификация, диагностирование и т.п.

2.5. Измерительные сигналы и их преобразование

Существующая государственная система приборов и средств автоматизации (ГСП) нацелена на стандартизацию измерительной техники и средств автоматизации, в том числе в соответствии с законами о техническом регулировании и обеспечении единства измерений. Она обеспечивает тем самым взаимocomплектуемость и взаимозаменяемость в системах контроля и управления.

В первую очередь стандартизация касается информационных измерительных сигналов в соответствии с двумя стандартизованными ветвями ГСП: электрической (аналоговой и дискретной) и пневматической. В аналоговой подветви электрической ветви ГСП используются сигналы в виде

- электрических постоянного тока: $(0 - 5)$ мА, $(1 - 5)$ мА, $(0 - 20)$ мА, $(4 - 20)$ мА, $(-5 - 5)$ мА;
- электрических постоянного напряжения $(0 - 1)$ В, $(-1 - 1)$ В, $(0 - 10)$ мВ, $(0 - 20)$ мВ, $(-10 - 10)$ мВ;
- электрических переменного напряжения $(0 - 2)$ В, $(-1 - 1)$ В.

В дискретной подветви электрической ветви ГСП применяют цифровые коды, диски, маски и частотно-цифровые сигналы в диапазоне 1 – 10 кГц при нормированном питании цепей 220 В по переменному току.

Пневматическая ветвь ГСП в качестве информативного параметра измерительного сигнала имеет давление воздуха 0,01 – 0,1 МПа при номинальном питании пневматических устройств 0,1 – 4 МПа. Наиболее часто при этом используются сигналы, имеющие начальное значение, отличное от нуля, так как их используют для проверки исправности линий связи.

Приведенные выше измерительные сигналы ГСП предназначены для использования в системах контроля и управления как стандартные выходные и входные сигналы блоков, входящих в системы, которые обеспечивают взаимоконтактуемость и взаимозаменяемость этих блоков в системах.

В средствах и системах измерений преобразования измерительных сигналов, точнее их информативных параметров, они весьма разнообразны и нестандартизованы [7].

Применение того или иного вида сигнала зависит от многих факторов: используемых принципов преобразования измеряемых величин в электрический сигнал для первичных измерительных преобразователей, требуемой точности и помехоустойчивости передачи измерительной информации, скорости изменения измеряемых величин и т.д. Существует множество различных видов сигналов. Важным классификационным признаком сигналов является характер их изменения во времени и по уровню. По этому признаку различают непрерывные (аналоговые), и дискретные сигналы. Дискретные по уровню сигналы называют также квантованными сигналами.

В современных интегрированных распределенных системах контроля и управления, т.е. в так называемых промышленных и др. сетевых структурах каналы связи для передачи данных между элементами сетей осуществляются стандартными интерфейсами. Они используются как для передачи данных от

полевых датчиков, установленных непосредственно на объектах, так и для связи различных блоков обработки, представления и хранения результатов измерений в основном на промышленные и другие компьютеры и контроллеры и далее в виде стандартных сигналов в разнообразные исполнительные механизмы [12]. Например, ASI (интерфейс нижнего уровня) может быть реализован в виде шины, кольца, дерева или звезды. Общая длина сегмента составляет не более 100 м, а с использованием удлинителей до 300 м. Максимальное время цикла составляет 5-10 мс. В качестве физической реализации линии связи для передачи данных используется 2-проводной кабель*, представляющий собой два проводника, упакованных в мягкую резиновую оболочку, которая обеспечивает гибкость и устойчивость к многократным изгибам. Скорость передачи ограничена 156 кбит/с, дальность передачи – 300 м.

Другим примером популярного интерфейса является HART-протокол, который реализует принцип частотной модуляции для организации цифровой передачи данных для измерительного сигнала в диапазоне 4-20 мА (рис. 2.4).

В стандартных интерфейсах на аналоговый сигнал 4-20 мА накладывается частотно - модулированный цифровой сигнал с амплитудой колебаний $\pm 0,5$ мА. Логической единице соответствует частота 1200 Гц, логическому нулю – 2200 Гц. Физический канал – экранированная витая пара.

HART-протокол позволяет передавать данные со скоростью до 1200 бит/с. В нем реализована схема отношений между узлами сети по принципу MASTER/SLAVE. В сети может присутствовать до двух MASTER-узлов (обычно один).

* Примечание. Как известно [12], физическими каналами могут быть коаксиальные кабели, витые пары, оптоволокно, радиоканалы, ИК-каналы.

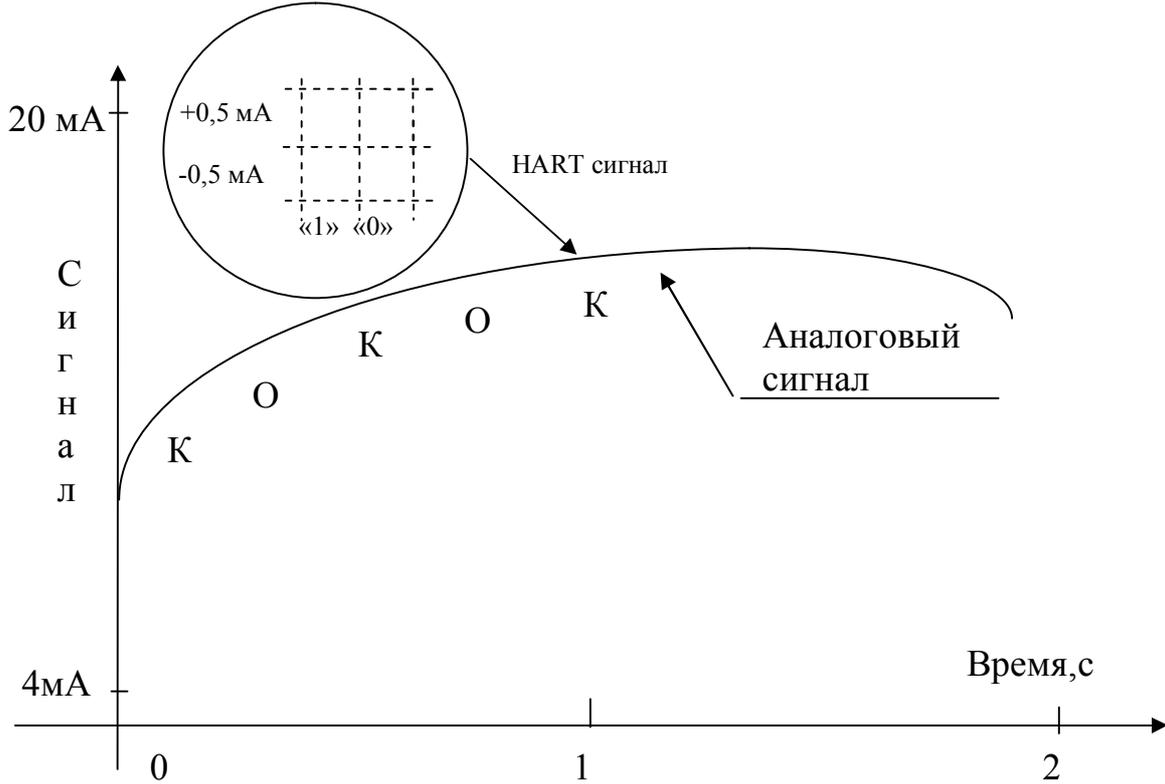


Рис.2.4. Организация принципа частотной модуляции

Для передачи данных по сети используются два режима:

По схеме «запрос/ответ», т.е. асинхронный обмен данными (один цикл укладывается в 500 мс).

Все пассивные узлы непрерывно передают свои данные на MASTER-узел (время обновления данных в MASTER-узле 250-300 мс).

Возможно построение топологии типа «шина» (до 15 узлов), когда несколько узлов подключены на одну витую пару. Питание осуществляется по шине.

Глава 3. Основы теории погрешностей

3.1. Определение и классификация погрешностей результатов измерений

Количество факторов, влияющих на точность измерения, достаточно велико, и любая классификация погрешностей измерения в известной мере условна, так как составляющие погрешности и их зависимости от условий измерительного процесса проявляются различно (см. табл.3.1). Поэтому для практических целей достаточно рассмотреть систематические, случайные составляющие и промахи общей погрешности, выраженные в абсолютных и относительных единицах при прямых, косвенных, совокупных и совместных равноточных измерениях.

Отклонение результата измерения X от истинного значения $X_{И}$ (действительного значения $X_{Д}$) величины называется погрешностью измерения:

$$\Delta_x = X - X_{И} (X_{Д}). \quad (3.1)$$

На практике вместо истинного значения используют действительное значение величины - значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него, иначе под действительным значением понимается такое значение физической величины (контрольное, образцовое, эталонное), которое известно с меньшей погрешностью, чем измеренное.

Такое детерминированное определение погрешности измерения используют в практике поверок и калибровок СИ (см.гл.2.2).

В современных измерительных операциях рекомендуется использовать другой подход при определении погрешности измерения [13].

Вследствие несовершенства применяемых методов и средств измерений, нестабильности условий измерений и других причин результат каждого измерения отягощен изменяющейся погрешностью. Но, так как $X_{И}$ и $X_{Д}$ неизвестны, погрешность Δ_x также остается неизвестной. Она является случайной величиной и поэтому в лучшем случае может быть только оценена по правилам математической статистики. Это должно быть сделано обязательно, поскольку результат измерения без указания оценки его погрешности не имеет практической ценности (см.гл.3.3).

Используя различные процедуры оценивания, находят интервальную оценку погрешности Δ_x , в виде которой чаще всего выступают доверительные границы $-\Delta_p, +\Delta_p$ погрешности измерений при заданной вероятности P . Под ними понимают верхнюю и нижнюю границы интервала, в котором с заданной вероятностью p находится результат измерения:

$$X - \Delta_p \leq X \leq X + \Delta_p, \quad (3.2)$$

т.е. значение измеряемой величины находится с вероятностью p в интервале $X - \Delta_p; X + \Delta_p$. Границы этого интервала называются доверительными границами результата измерений, а вероятность p – доверительной вероятностью.

Таким образом, в результате измерения находят не значение измеряемой величины, а оценку этого значения в виде границ интервала, в котором оно находится с заданной доверительной вероятностью.

Проявления погрешностей измерений достаточно разнообразны, также разнообразны способы представления их оценок.

Остановимся на ряде признаков классификации погрешностей измерений для их систематизации, приведенные в табл.3.1.

Классификация погрешностей результатов измерений

Признаки классификации погрешностей измерений	Классификация погрешностей измерений
1. По форме выражения	1.1. Абсолютные 1.2. Относительные 1.3. Проведенные
2. По характеру проявления	2.1. Систематические 2.2. Случайные 2.3. Промахи
3. По месту появления в процедуре измерений	3.1. Методические 3.2. Аппаратные (инструментальные) 3.3. Погрешности интерпретации (субъективные)
4. По зависимости от измеряемой величины	4.1. Независимые (аддитивные) 4.2. Пропорциональные (мультипликативные) 4.3. Зависимые
5. По зависимости от времени	5.1. Статические 5.2. Динамические 5.3. Погрешности измерения случайных величин и процессов

По форме выражения погрешности делят на абсолютные, относительные и приведенные погрешности.

Абсолютная погрешность измерения - это погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины. Так, погрешность Δ_x в формуле (3.1) является абсолютной погрешностью. Недостатком такого способа выражения

этих величин является то, что их нельзя использовать для сравнительной оценки точности разных измерительных технологий. Действительно, $\Delta_x = 0,05$ мм при $X = 100$ мм соответствует достаточно высокой точности измерений, а при $X = 1$ мм — низкой. Этому недостатка лишено понятие «относительная погрешность», определяемая выражением

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{X_D} \text{ или } \delta_x = \frac{\Delta_x}{X}. \quad (3.3)$$

Необходимо обратить внимание на неоднозначность такого определения зависимости (3.3). Если обозначить первое выражение $\delta_D = \frac{\Delta_x}{X_D}$, второе -

$$\delta_{II} = \frac{\Delta_x}{X}, \text{ а } \Delta_x = X - X_D, \text{ то } \delta_{II} = \delta_D - \frac{\delta_D^2}{1 + \delta_D}.$$

Расчеты по этому соотношению для отрицательных и положительных значений δ_D составят:

δ_D	-0,3	-0,2	-0,1	+0,1	+0,2	+0,3
δ_{II}	-0,43	-0,25	-0,11	+0,09	+0,17	+0,23

Итак, использование относительного значения погрешности, как правило, отнесенного к результату измерения и без учета знака Δ_x , может вносить дополнительную неопределенность.

Таким образом, *относительная погрешность* измерения — отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины X_D или результату измерений X .

Для характеристики точности СИ часто применяют понятие «приведенная погрешность», определяемое формулой

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{X_N}, \quad (3.4)$$

где X_N — значение измеряемой величины, условно принятое за нормированное значение измеряемой величины. Чаще всего в качестве X_N принимают алгебраическую разность между верхним и нижним пределами этого диапазона измерений (см.гл.4): $X_N = X_{\max} - X_{\min}$.

Таким образом, **приведенная погрешность** средства измерения — отношение абсолютной погрешности средства измерения к нормированному значению X_N этого СИ.

По источнику возникновения погрешности измерений делят на инструментальные, методические погрешности и погрешности интерпретации.

Инструментальная погрешность измерения — составляющая погрешности измерения, обусловленная несовершенством применяемого СИ: отличием реальной функции преобразования прибора от его калибровочной зависимости, неустранимыми шумами в измерительной цепи, запаздыванием измерительного сигнала при его прохождении в СИ, внутренним сопротивлением СИ и др. Инструментальная погрешность СИ разделяется на основную (погрешность измерений при применении СИ в нормальных или номинальных условиях) и дополнительную. Последняя составляющая погрешности СИ возникает вследствие отклонения какой-либо из влияющих на СИ величин от ее номинального значения или выхода влияющих величин за пределы расширенной области значений, разрешенного при эксплуатации конкретного СИ (см.гл.4.3).

Методическая погрешность измерений — составляющая погрешности измерений, обусловленная в основном несовершенством модели измеряемой величины. К ней относят погрешности, обусловленные отличием принятой модели объекта измерения от реального объекта, неточностью формул, применяемых при нахождении результата измерений, и другими факторами, не связанными со свойствами СИ. Примерами методических погрешностей измерений являются:

- погрешности изготовления цилиндрического тела (отличие от идеального круга) при измерении его диаметра;
- несовершенство определения диаметра круглого тела как среднего из значений диаметра в двух его заранее выбранных перпендикулярных плоскостях;
- погрешность модели измеряемой температуры тел из-за невозможности определения скорости движения атомов и молекул в исследуемых телах;
- погрешность измерений массы нефтепродукта в резервуаре пьезометрическим способом вследствие неравномерности плотности нефтепродукта по высоте резервуара и др.

Погрешность интерпретации (субъективная) – составляющая погрешности, связанная с несовершенством оценивания результатов измерений, в том числе при программно-алгоритмической обработке данных наблюдений. В простейшем случае – это погрешность операторов при отсчете показаний по шкалам СИ, которая вызывается несовершенством органов чувств, эргономическими свойствами отсчетных устройств, состоянием оператора.

По зависимости погрешностей Δ от измеряемой физической величины деление на **независимые** (аддитивные) $\Delta x \neq f(X)$ и **зависимые** (в частном случае мультипликативные) $\Delta x = f(X)$ **погрешности** позволяет получить более адекватные реальные модели изменения погрешностей преобразования СИ входной величины в выходную (см.гл.4.2).

Отсюда следуют принятые правила нормирования классов точности СИ [16], а также способы совершенствования погрешностей СИ, поскольку уменьшение аддитивных и мультипликативных составляющих погрешностей осуществляется по-разному. Это разделение погрешностей целесообразно использовать при суммировании погрешностей результатов и средств измерений.

Деление погрешностей на *статические* и *динамические* соответствует статическим или динамическим характеристикам измеряемых физических величин и свойствам СИ. При этом статическими погрешностями характеризуются результаты измерения, когда условно во время эксперимента можно считать измеряемую физическую величину постоянной. Динамические погрешности определяются в случае, если измеряемая физическая величина изменяется во время измерительного эксперимента или если измерению подлежат характеристики случайных процессов.

Анализ погрешностей согласно второму признаку как наиболее содержательному будет рассмотрен ниже.

3.2. Систематические, случайные погрешности и промахи

По характеру проявления разделяют систематические, случайные погрешности и промахи (грубые погрешности).

Систематическая погрешность измерения – составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. Систематические погрешности подлежат исключению, насколько возможно, тем или иным способом. Наиболее известный из них при уточнении результатов измерений – введение поправок на известные систематические погрешности. При создании СИ систематические погрешности уменьшают хотя бы до уровня случайных структурными, схемными, конструктивными или технологическими приемами. Однако полностью исключить систематическую погрешность практически невозможно, и какая-то ее небольшая часть остается и в исправленном (после введения поправок) результате измерений. Эти остатки называются неисключенной систематической погрешностью (НСП). НСП – погрешность измерений, обусловленная погрешностями вычисления и введения поправок или же систематической погрешностью, на действие которой поправка не введена.

Например, с целью исключения систематической погрешности измерения, обусловленной нестабильностью функции преобразования аналитического прибора, проводят периодически его калибровку по эталонным мерам (поверочным газовым смесям или стандартным образцам). Однако, несмотря на это, в момент измерения все равно будет некоторое отклонение действительной функции преобразования прибора от калибровочной зависимости, обусловленное погрешностью калибровки и дрейфом функции преобразования прибора за время, прошедшее после калибровки. Погрешностью измерения, обусловленной этим отклонением, является НСП.

Причинами возникновения *систематических погрешностей* являются инструментальные погрешности средств измерения, погрешности, связанные с неправильной установкой средств измерений, погрешности, возникающие вследствие внешних влияний, теоретические погрешности, вызванные недостатками моделей измерений, субъективные систематические погрешности.

По характеру проявления систематические погрешности разделяют на постоянные и переменные, причем последние бывают возрастающими или убывающими, периодическими и изменяющимися по сложному закону.

Это деление носит в известной мере условный характер, так как не всегда можно провести четкие границы между названными группами.

Выявление и уменьшение систематических погрешностей измерений являются важнейшими задачами метрологии, и для их решения разработано много различных приемов и способов. Наиболее трудно обнаружить постоянную систематическую погрешность, не изменяющуюся за время измерения, которая, как правило, проявляется в рядах многократных измерений (и средствах измерений). Такую погрешность выявляют с помощью измерения данной величины двумя независимыми СИ, основанными на использовании различных физических эффектов или принципов действия.

Если получены два ряда многократных наблюдений одной величины X , выполненных двумя независимыми способами или различной по принципу действия аппаратурой, то можно провести статистический анализ для обнаружения систематической погрешности.

Статистическое исследование допустимости различия между средними арифметическими двух групп наблюдений можно производить различными способами. Обычно используют проверку однородности групп наблюдений (отсутствия значимых смещений относительно друг друга), либо с помощью определения однородности оценок дисперсий и средних отдельных групп наблюдений по критериям Лапласа, Стьюдента, Бартлетта, Фишера и Аббе, либо регрессионным анализом с целью обнаружения связи между наблюдениями и значениями измеряемой величины, полученными в разное время и в разных условиях.

Рассмотрим два простейших способа проверки допустимости различия между средними значениями двух групп наблюдений, распределенных по нормальному закону.

1. Если число наблюдений достаточно велико ($n > 30$), рекомендуется вычислить оценку среднеквадратических значений $S(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)$ для разности средних значений двух групп наблюдений \bar{X}_1 и \bar{X}_2 .

$$S(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}, \quad (3.5)$$

где σ_1 , σ_2 – среднеквадратические отклонения (СКО) в двух группах наблюдений,

n_1 , n_2 – число наблюдений в двух группах.

Выбрав уровень значимости q , определяют $a = 1 - q$ и по таблице нормированной функции Лапласа $\Phi_H(z) = a/2$ находят значение аргумента функции $z(a/2)$. Различие между средними значениями групп наблюдений считается допустимым, если

$$|\bar{X}_1 - \bar{X}_2| \leq z\left(\frac{a}{2}\right) S(\bar{X}_1 - \bar{X}_2). \quad (3.6)$$

2. Если число наблюдений мало ($n < 30$), а $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$, рекомендуется определять значение параметра

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (3.7)$$

где S_i – оценки среднеквадратических значений групп наблюдений.

Далее, задаваясь уровнем значимости q , по таблице распределения Стьюдента при числе степеней свободы $k = n_1 + n_2 - 2$ находят предельное допустимое значение $t(q, k)$. Если $t \leq t(q, k)$, то различия между средними значениями \bar{X}_1 и \bar{X}_2 принимают допустимыми, т. е. систематическая погрешность отсутствует.

Для технических измерений систематические погрешности (и грубые погрешности) выявляют с помощью приборов высокого класса точности, путем предварительной поверки и градуировки технических средств измерения по образцовым устройствам или сличением полученных наблюдений с данными лабораторных анализов (если последние производятся с достаточной точностью и одновременно с наблюдением).

Способы уменьшения систематических погрешностей условно можно разделить на экспериментальные, которыми пользуются исследователи, и инструментальные, которыми пользуются разработчики средств измерений, технически реализуя пути повышения точности измерительных устройств, в том числе для уменьшения их систематических погрешностей. Среди экспериментальных способов уменьшения систематических погрешностей наиболее известны следующие:

- устранение причин возникновения погрешностей до начала измерения (профилактика погрешностей);
- исключение погрешностей в процессе измерения (способ изменения знака погрешности или измеряемой величины, способ симметричных наблюдений, периодических наблюдений и др.; фактически те же способы разрабатываются в теории планирования экспериментов);

• введение поправок $\Delta_{\text{попр}}$ (поправкой называется значение систематической погрешности, взятое с противоположным знаком $\Delta_{\text{попр}} = -\Delta_c$, одноименное с измеряемой величиной, прибавляемое к полученному при измерении значению величины с целью исключения систематической погрешности), которые учитывают составляющие систематической погрешности, вызываемые влияющими факторами, и уточняют результат после проведения измерений путем вычисления $X_d = X + \Delta_{\text{попр}} = X + (-\Delta_c)$.

Например, способ изменения знака погрешностей заключается в том, что измерение проводят дважды так, чтобы известная по природе, но неизвестная по значению погрешность входила в результаты измерений с противоположными знаками. Среднее значение не будет содержать этой погрешности.

Исключение погрешностей экспериментальными способами требует повторных измерений и поэтому они приемлемы для сравнительно стабильных измеряемых величин (при полной уверенности в правильности воспроизведения остальных влияющих факторов).

Теоретически минимальным уровнем систематических погрешностей является уровень случайных погрешностей в предположении идеальных условий эксперимента. Практически (при компенсации погрешности) этот уровень недостижим, поскольку точность измерения физических факторов, вызывающих систематические погрешности, и самих погрешностей ограничена. Из этого следует, что практически получаемая при компенсации систематическая погрешность всегда остается по уровню выше теоретической, причем эта погрешность проявляется как случайная, поскольку влияние физических факторов происходит на уровне случайного характера их изменения.

Если нельзя исключить систематические погрешности (даже если они известны), приходится ограничиваться лишь оценкой возможных систематических погрешностей. Обычно за оценочную погрешность

Δ_c^* принимают в соответствии с ГОСТ 8.009—72 среднее значение погрешности, определяемое экспериментально при многократном измерении неизменных значений измеряемой величины.

Случайной погрешностью измерения называется составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же величины. Причины случайных погрешностей многообразны: шумы измерительного прибора, вариация его показаний, случайные колебания параметров электрической сети и условий измерений, погрешности округления отсчетов и многие другие. В появлении таких погрешностей не наблюдается какой-либо закономерности, они проявляются при повторных измерениях одной и той же величины в виде разброса результатов измерений. Поэтому оценивание случайных погрешностей измерений возможно только на основе математической статистики (эта математическая дисциплина родилась как наука о методах обработки рядов измерений, отягощенных случайными погрешностями).

В отличие от систематических, случайные погрешности нельзя исключить из результатов измерений путем введения поправок, однако их влияние можно существенно уменьшить проведением многократных измерений.

Поэтому в качестве оценок случайных погрешностей Δ^* (* - знак оценки) используются следующие.

1. Для представления случайной погрешности приводят закон ее распределения как случайной величины [14] в табличном, графическом или аналитическом виде. Такая оценка является исчерпывающей, но неудобной для практического использования.

2. Случайная погрешность оценивается доверительным интервалом $\overline{\alpha, \beta}$ с указанием доверительной вероятности P_g

$$\overset{o}{\Delta}^* = \overline{\alpha, \beta}, P_g.$$

Чаще доверительный интервал приводится в значениях СКО $\overset{o}{\Delta}^* = \overline{k_1\sigma, k_2\sigma}, P_g$ или если интервал симметричный $k_1 = k_2$, то $\overset{o}{\Delta}^* = \pm k\sigma, P_g$.

Например, для нормального закона распределения случайных погрешностей ее оценками будут

$$\begin{aligned} -\sigma < \overset{o}{\Delta}^* < +\sigma \text{ и } P_g &= 0,68 \\ -2\sigma < \overset{o}{\Delta}^* < +2\sigma \text{ и } P_g &= 0,95 \\ -3\sigma < \overset{o}{\Delta}^* < +3\sigma \text{ и } P_g &= 0,997. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Основным недостатком оценок случайных погрешностей доверительными интервалами $\overline{\alpha, \beta}$ с указанием доверительной вероятности P_g является произвольность выбираемых значений P_g , что не позволяет использовать эти оценки при суммировании погрешностей результатов и средств измерений.

3. В ряде случаев используются среднеарифметическая $\overset{o}{\Delta}^* = \pm |\Delta|_{\text{cp}}$ и наиболее вероятная $\overset{o}{\Delta}^* = \pm \Delta_{\text{н.в.}}$ (которая чаще всего, но не всегда определяется при $P_g=0,5$) оценки случайной погрешности. Эти оценки не имеют указания на доверительную вероятность, т.е. не характеризуются степенью доверия и обладают указанными выше недостатками.

4. В метрологической практике определяют максимальную по значению (или предельную) оценку случайной погрешности $\overset{o}{\Delta}^* = \pm \Delta_{\text{max}}$. Эта оценка определяется как максимальная (положительная или отрицательная) погрешность, встретившаяся в поверочном ряду измерений. Ее основное преимущество – простота определения – послужило основой для использования максимальной оценки в законодательной метрологии для

нормирования классов точности, при поверке и калибровке средств измерения [15, 16]. Однако, эта оценка обладает рядом существенных недостатков, главным из которых является ее случайность и неудобство для определения суммарных значений погрешностей измерений.

Грубой погрешностью измерения (*промахом*) называют погрешность измерения, существенно превышающую ожидаемую при данных условиях погрешность. Они возникают, как правило, из-за ошибок или неправильных действий оператора (неверный отсчет, ошибка в записях или вычислениях, неправильное включение СИ и др.). Возможной причиной промаха могут быть сбои в работе технических средств, а также кратковременные резкие изменения условий измерений. Естественно, что грубые погрешности должны быть обнаружены и исключены из ряда измерений.

Обычно они сразу видны в ряду измерений и, если возможно, эксперимент следует повторить. В противном случае наличие промаха необходимо доказать. Существует ряд критериев для вероятностной оценки промахов.

1. Наиболее простым критерием промаха является назначение априори (до опыта) вероятности промаха $P_{\Pi}^{\text{зад}}$. Если экспериментальная вероятность промахов после опыта $P_{\Pi}^{\text{экс}}$ меньше, чем $P_{\Pi}^{\text{зад}}$, т.е. $P_{\Pi}^{\text{зад}} > P_{\Pi}^{\text{экс}}$, то результаты измерений, содержащие грубые погрешности относят к исследуемому ряду измерений.

2. Для анализа наличия промаха часто используют критерий 3σ . Если значение грубого результата X_n превышает среднее значение результата измерения больше, чем на 3σ , т.е. $|X_n - \bar{X}| > 3\sigma$, то такая грубая погрешность относится к промахам, а результат, содержащий эту погрешность, исключается из рассматриваемого ряда. При этом значения \bar{X} и σ повторно вычисляют без учета X_n . Вероятность такого критерия можно предполагать равным $P_{\Pi} \leq 0,003$ (что соответствует оценке при нормальном

законе распределения случайных погрешностей). Этот критерий надёжен при числе измерений $n \geq 20 - 50$.

3. Если число измерений невелико ($n \leq 10$), то используют критерий Шовине. В этом случае промахом отягощен результат X_n , если разность $|X_n - \bar{X}|$ превышает размер σ , приведенных ниже в зависимости от числа наблюдений

$$|X_n - \bar{X}| > \begin{cases} 1,6 \sigma \text{ при } n = 3 \\ 1,7 \sigma \text{ при } n = 6 \\ 1,9 \sigma \text{ при } n = 8 \\ 2,0 \sigma \text{ при } n = 10 \end{cases}$$

3.3. Неопределённость результатов измерений

В 1993 г. опубликовано рядом авторитетных международных организаций «Руководство по выражению неопределенности измерений» [13]. Руководство фактически приобрело статус международного регламента, обязательного к применению. Оно нацелено, во-первых, на обеспечение потребителей полной информацией обо всех составляющих погрешности результатов измерений и, во-вторых, на международную унификацию отчетов об измерениях и оценке их точности с целью формирования основы для международного сравнения результатов измерений. При этом имеется в виду, что всемирное единство в способах оценки точности измерений обеспечивает правильное использование результатов измерений во всех областях деятельности.

Концепция неопределенности, введенная в Руководстве, заключается в следующем. Базовые понятия классической теории точности: истинное значение, действительное значение и погрешность измерения – не вводятся (при этом подразумевается, что истинное (действительное) значение величины существует, поскольку признается, что целью измерения является

нахождение этого значения). Взамен введено понятие «неопределенность измерения», понимаемое как сомнение, неполное знание значения измеряемой величины после проведения измерения (трактовка в широком смысле) и как количественное описание этого неполного знания (трактовка в узком смысле). Далее это понятие уточняется: неопределенность – параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть приписаны измеряемой величине. В математической статистике известны два вида параметров, характеризующих рассеяние некоррелированных случайных величин: СКО и доверительный интервал. Они и принимаются в качестве характеристик неопределенности с наименованиями «стандартная неопределенность» и «расширенная неопределенность». При этом, как и следовало ожидать, оказалось, что стандартная неопределенность является полным аналогом СКО погрешности измерений, а расширенная неопределенность — полным аналогом доверительных границ погрешности измерений. И в этом указанная концепция сомкнулась с традиционной постановкой задачи оценивания точности измерений.

Классическая теория точности и концепция неопределенности отличаются тем, к какой величине относят дисперсию, характеризующую разброс наблюдаемых значений. При классическом подходе ее относят к истинному значению измеряемой величины X_d , а в другом случае – к результату измерений X . Но это различие не влияет на подведение окончательных результатов, поскольку и в классическом подходе погрешности измерений также приписывают результату измерений. Таким образом, обе концепции дополняют друг друга, сливаясь в единую концепцию оценивания точности результатов измерений. При этом, следуя причинно-следственным связям, целесообразно установить следующую последовательность введения основных понятий теории точности измерений: истинное значение величины => действительное значение величины => результат измерения => погрешность измерения => неопределенность результата измерения как характеристика этой погрешности.

Таким образом, понятия «погрешность» и «неопределенность» могут быть гармонично использованы без их взаимного противопоставления.

Аналогично погрешностям, неопределенности измерений могут быть классифицированы по различным признакам.

1. По способу выражения их подразделяют на абсолютные и относительные.

Абсолютная неопределенность измерения – неопределенность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины.

Относительная неопределенность результата измерений – отношение абсолютной неопределенности к результату измерений.

2. По источнику возникновения неопределенности измерений, подобно погрешностям, можно разделять на инструментальные, методические и субъективные.

3. По характеру проявления погрешности разделяют на систематические, случайные и грубые. В Руководстве отсутствует классификация неопределенностей по этому признаку. В самом начале документа указано, что перед статистической обработкой рядов измерений все известные систематические погрешности должны быть из них исключены. Поэтому деление неопределенностей на систематические и случайные не вводилось. Вместо него приведено деление неопределенностей по способу оценивания на два типа:

- неопределенность, оцениваемая по типу А (неопределенность типа А) – неопределенность, которую оценивают статистическими методами;
- неопределенность, оцениваемая по типу Б (неопределенность типа Б) – неопределенность, которую оценивают нестатистическими методами.

Соответственно, предлагается и два метода оценивания:

- оценивание по типу А – получение статистических оценок на основе результатов ряда измерений;
- оценивание по типу Б – получение оценок на основе априорной нестатистической информации.

На первый взгляд, кажется, что это нововведение заключается лишь в замене существующих терминов известных понятий другими. Действительно, статистическими методами можно оценить только случайную погрешность, и поэтому неопределенность типа А – это то, что ранее называлось случайной погрешностью. Аналогично, НСП можно оценить только на основе априорной информации, и поэтому между неопределенностью по типу Б и НСП также имеется взаимно однозначное соответствие.

Однако, с точки зрения метрологической практики, введение этих понятий является вполне разумным. Дело в том, что при измерениях по сложным методикам, включающим большое количество последовательно выполняемых операций, необходимо оценивать и учитывать большое количество источников неопределенности конечного результата. При этом их деление на НСП и случайные может оказаться ложно ориентирующим.

Вместе с тем, традиционное разделение погрешностей на систематические, НСП и случайные также не теряет своего значения, поскольку оно точнее отражает другие признаки: характер проявления в результате измерения и причинную связь с эффектами, являющимися источниками погрешностей. Таким образом, классификации неопределенностей и погрешностей измерений не являются альтернативными и взаимно дополняют друг друга.

В Руководстве имеются и некоторые другие терминологические нововведения. Ниже приведена сводная таблица терминологических отличий концепции неопределенности от классической теории точности [1] (табл.3.2).

Новые термины, указанные в этой таблице, имеют следующие определения:

1. Стандартная неопределенность — неопределенность, выраженная в виде стандартного отклонения.
2. Расширенная неопределенность — величина, задающая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого, как ожидается, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием

могут быть приписаны измеряемой величине.

3. Вероятность охвата — вероятность, которой, по мнению экспериментатора, соответствует расширенная неопределенность результата измерений.

4. Коэффициент охвата — коэффициент, зависящий от вида распределения неопределенности результата измерений и вероятности охвата и численно равный отношению расширенной неопределенности, соответствующей заданной вероятности охвата, к стандартной неопределенности.

5. Число степеней свободы — параметр статистического распределения, равный числу независимых связей оцениваемой статистической выборки.

Таблица 3.2

Термины — примерные аналоги концепции неопределенности и классической теории точности

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

Следует подчеркнуть, что при определении, и особенно при нормировании погрешностей СИ, тем более технических, концепция неопределенности по-видимому не может использоваться, так как она, в основном, относится к способам оценки точности результатов, а не СИ.

3.4. Погрешности результатов прямых, косвенных, совокупных и совместных измерений

3.4.1. Погрешности результатов прямых многократных измерений

При многократных измерениях результат находят путем статистической обработки ряда экспериментальных данных, часто называемых параллельными измерениями. Итак, при измерении получают ряд экспериментальных данных $U_1, U_2 \dots U_n$. Результат измерения U_i может содержать не только случайную погрешность, но и систематическую, и поэтому называется неисправленным результатом измерения. Систематическую погрешность стараются исключить, используя специальные приемы. Если представляется возможным оценить систематическую погрешность Δ_c , то в экспериментальные данные вносят поправку, равную оценке систематической погрешности, взятой с обратным знаком:

$$x_i = y_i - \Delta_c . \quad (3.9)$$

Значения X_i , называются исправленными результатами измерений. Они отягощены случайной погрешностью и оставшейся частью неисключенной систематической погрешности (НСП). Случайная погрешность оценивается статистическими методами и поэтому определяет неопределенность результата измерений типа А. НСП, оцениваемая на основе априорной информации, определяет неопределенность типа Б.

Статистическая обработка проводится следующим образом.

1. За результат измерений принимается среднее арифметическое экспериментальных данных

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.10)$$

где x_i — исправленный результат i -го измерения;

n — число измерений.

С целью удобства вычислений эту формулу можно записать в виде

$$\bar{X} = x_0 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i, \quad (3.11)$$

где x_0 - близкое к \bar{X} значение, удобное для расчета,

$$z_i = x_i - x_0.$$

2. Определяется стандартная неопределенность типа А ряда измерений по формуле

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

либо

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}, \quad (3.12)$$

где $\bar{z} = \bar{x} - x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$.

Деление суммы в этой формуле на $n-1$, а не на n связано с необходимостью получения несмещенной оценки СКО рассеивания экспериментальных данных относительно центра распределения.

3. Определяется стандартная неопределенность типа А результата измерений по формуле

$$u_A(\bar{x}) = \frac{u_A(x)}{\sqrt{n}}. \quad (3.13)$$

4. Оцениваются все составляющие неопределенности результата

измерений типа Б. j -я составляющая (НСП, обусловленная j -м фактором) оценивается интервалом $[-U_j, +U_j]$. Для каждой составляющей, исходя из представлений о виде ее распределения и вероятности охвата P , определяется коэффициент охвата k_j .

5. Оцениваются все стандартные неопределенности типа Б по формуле

$$u_{Bj}(x) = \frac{U_j}{k_j}. \quad (3.14)$$

При равновероятном распределении j -й составляющей в интервале $[-U_j, +U_j]$ стандартная неопределенность находится по формуле

$$u_{Bj}(x) = \frac{U_j}{\sqrt{3}}. \quad (3.15)$$

6. Оценивается суммарная стандартная неопределенность результата измерений по формуле

$$u(\bar{x}) = \sqrt{u_A^2(\bar{x}) + \sum_{j=1}^m u_{Bj}^2(x)}. \quad (3.16)$$

7. Оценивается расширенная неопределенность результата измерений интервалом $[-U(\bar{x}), +U(\bar{x})]$, границы которого вычисляются по формуле

$$U(\bar{x}) = k_p \cdot u(\bar{x}). \quad (3.17)$$

Коэффициент охвата k_p рекомендуется [13] принимать равным квантилю распределения Стьюдента при вероятности охвата $p=0,95$ и эффективном числе степеней свободы распределения неопределенности ν_{eff} :

$$k_p = t_{p=0,95}(\nu_{eff}) \quad (3.18)$$

Поэтому коэффициент охвата выбирается по таблицам распределения Стьюдента для вероятности $P = 0,95$ и числе степеней свободы, равном ν_{eff} , округленном до ближайшего целого числа, меньшего ν_{eff} . Эти значения приведены в табл.3.3.

Коэффициенты охвата k_p для различных степеней свободы ν_{eff}

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k_p	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

3.4.2. Погрешности результатов прямых однократных измерений

Прямые измерения с однократными наблюдениями являются наиболее распространенными и на производстве, и в научных исследованиях. Если проводится только одно наблюдение, то за результат измерения принимается единственное полученное значение измеряемой величины.

Оценка погрешностей результатов однократных измерений, которые реализуются с помощью СИ, производится априорно (независимо от опыта) или апостериорно (основано на опыте):

1. Как известно, средства измерения имеют нормированные метрологические характеристики, которые представляют собой количественные значения основной (в нормальных или номинальных условиях эксплуатации) и дополнительных (при отклонении внешних влияющих величин от номинальных или нормальных значений) погрешностей согласно ГОСТ 8.401-80. При расчете однократных погрешностей результатов измерений, произведенных с помощью таких СИ, необходимо определить их размер в абсолютной или, что лучше, в относительной формах.

Если предел допускаемых основных погрешностей конкретного СИ проноормирован абсолютным значением погрешности по одночленной ($a=const$) или двучленной ($a=const, b=const$) формам, то относительное значение погрешности в результате измерения величины X определяется по формулам

$$\delta = \pm \frac{a \cdot 100}{x}, \% \quad (3.19)$$

или

$$\delta = \pm \frac{(a + bx) \cdot 100}{x} = \pm \left(\frac{a}{x} + b \right), \% \quad (3.20)$$

Если предел допускаемых основных погрешностей СИ пронормирован значением приведенной погрешности ($\gamma = \pm p = const$), то абсолютный размер погрешности результата измерения x составит

$$\Delta = \pm \frac{\gamma \cdot X_N}{100}, \quad (3.21)$$

где X_N - нормированное значение, известное для СИ (в общем случае $X_N = x_{\max} - x_{\min}$ в алгебраическом смысле), а относительная величина погрешности

$$\delta = \frac{\Delta \cdot 100}{x} = \frac{\gamma \cdot X_N}{x}, \% \quad (3.22)$$

Если предел допускаемых основных погрешностей конкретного СИ нормирован по значению относительной погрешности по одночленной ($c = const$) или двучленной ($c = const, d = const$) зависимости, то относительный размер погрешности результата измерения определяется по зависимостям в первом случае

$$\delta = \pm c, \% \quad (3.23)$$

а во втором

$$\delta = \pm \left[c + d \left| \frac{x_k}{x} - 1 \right| \right], \% \quad (3.24)$$

где x_k - конечное значение измеряемой величины на шкале прибора.

Абсолютная погрешность результата измерения при одночленной форме выражения для относительной погрешности составит

$$\Delta = \pm \frac{\delta \cdot x}{100}, \quad (3.25)$$

а при двучленной форме определяется выражением

$$\Delta = \pm \frac{1}{100} [dx_k + (c - d)x]. \quad (3.26)$$

При этом необходимо подчеркнуть, что в приведенных формулах следует обратить внимание на зависимость Δ или δ от измеряемых величин, что подтверждает необходимость вычислять погрешности результатов измерений независимо от обозначенных на СИ классах точности.

Кроме основной погрешности следует оценивать дополнительную погрешность по известным условиям эксплуатации СИ и нормативам воздействия внешних влияющих величин, полученным из паспортных данных. Дополнительная абсолютная погрешность от каждой j -й внешней влияющей величины вычисляется отдельно:

$$\Delta_j = \Psi_j (\xi_{jэкс} - \xi_{jном}), \quad (3.27)$$

где Ψ_j - функция влияния j -й внешней влияющей величины; $\xi_{jэкс}$ - значения j -й влияющей величины при эксплуатации; $\xi_{jном}$ - номинальное значение j -й внешней влияющей величины.

Тогда абсолютная погрешность результата измерения в реальных условиях эксплуатации составит

$$\Delta_p = \Delta + \sum_{j=1}^m \Delta_j, \quad (3.28)$$

где Δ - основная погрешность СИ; m - число внешних влияющих величин, для которых в паспорте приведены функции влияния Ψ_j .

Относительная погрешность результата измерения в реальных условиях эксплуатации определяется по формуле

$$\delta = \pm \frac{\Delta_p \cdot 100}{x}, \% \quad (3.29)$$

Таким образом, результат измерения имеет неопределенность в диапазоне наименованных значений $x - \Delta_p < x_{рез.изм.} < x + \Delta_p$ или в относительной форме $x_{рез.изм.} = x \pm \delta_p$.

С целью контроля отсутствия в экспериментальных данных грубых погрешностей часто выполняют 2-3 наблюдения, тогда результатом измерения оказывается среднее арифметическое их результатов. Таким образом, нахождение результата измерения в этом случае очевидно.

Обработка данных сводится в основном к оцениванию погрешности измерения на базе априорной информации, роль которой здесь особенно велика. Она существенно различается для трех групп измерений, выделяемых в зависимости от степени полноты априорной информации.

2. Разумеется, наиболее тщательно выполняется оценивание погрешностей при метрологических измерениях (с точным апостериорным оцениванием погрешностей). При этом наряду с типовыми характеристиками (известными из технической документации) учитываются индивидуальные метрологические характеристики средств измерений и значения влияющих величин. Специфика подобного расчета заключается в том, что можно вычислить поправки на некоторые систематические погрешности и внести их в результат измерения, повысив точность последнего.

В общем случае при точном апостериорном оценивании погрешностей реализуются следующие операции:

- определяется основная погрешность и функции влияния для конкретных средств измерений;
- оцениваются дополнительные погрешности СИ (на основе результатов измерений влияющих величин);
- выявляются систематические составляющие погрешности измерения;
- вводятся поправки в результат наблюдения;
- суммируются неисключенные систематические погрешности (НСП);
- оцениваются случайные погрешности (на основе априорных данных);

- суммируются случайные и систематические погрешности, в итоге получают границы суммарной погрешности;
- записывается результат измерения (вместе с оценками погрешностей) согласно установленным правилам.

Погрешность результата измерения $\delta_{p.u.}$ обычно представляется в виде суммы составляющих:

$$\delta_{p.u.} = \delta_m + \delta_{СИ} + \delta_{ин}, \quad (3.30)$$

где δ_m - методическая погрешность, $\delta_{СИ}$ - инструментальная (или априорная) погрешность (погрешность СИ), $\delta_{ин}$ - погрешность интерпретации (отсчета, личная).

Систематическая составляющая инструментальной погрешности складывается из основной и дополнительных составляющих:

$$\delta_{cСИ} = \delta_{co} + \sum_{j=1}^n \delta_{cдоп j}, \quad (3.31)$$

где δ_{co} – основная составляющая систематической инструментальной погрешности; $\delta_{cдоп j}$ – j-я дополнительная составляющая систематической инструментальной погрешности; j – номер влияющей величины, $j=1, n$.

Систематическая составляющая погрешность результата измерения определяется выражением:

$$\delta_{c p.u.} = \delta_{cm} + \delta_{cСИ} + \delta_{cин}. \quad (3.32)$$

Поэтому вносимая поправка имеет вид

$$\delta_{нопр СИ} = -\delta_{c p.u.}. \quad (3.33)$$

После введения поправки погрешность исправленного результата примет вид

$$X_{исп} = X_{изм} + \delta_{нопр СИ}. \quad (3.34)$$

Случайные составляющие погрешностей результата измерений суммируются геометрически

$$\delta_{p.u.}^{\circ} = \delta_m^{\circ} + \delta_{СИ}^{\circ} + \delta_{ин}^{\circ}, \quad (3.35)$$

где $\delta_{p.u.}^{\circ}$ - случайная составляющая погрешности результата измерений.

Она выражается через дольные или кратные значения СКО в зависимости от значения доверительной вероятности (одинаковые для всех составляющих суммы в выражении (3.35)) и закона распределения случайных составляющих погрешностей СИ, т.е. оценка доверительных границ случайной погрешности δ_r° определяется по формуле

$$\delta_{rp.u.}^{\circ} = t_P \cdot \delta_{p.u.}^{\circ}, \quad (3.36)$$

где коэффициент t_P зависит от доверительной вероятности P и от имеющейся информации о случайных составляющих.

Если известны точные СКО случайных составляющих, которые соответствуют нормальному распределению, то коэффициент t также соответствует нормальному распределению. Если известны оценки СКО, полученные по выборкам объемов n , и все они соответствуют нормальному распределению, то коэффициент t соответствует распределению Стьюдента, причем число степеней свободы принимают согласно наименьшему из объемов n выборок, по которым оценивались СКО.

При измерениях с однократными наблюдениями раздельное суммирование случайных и систематических погрешностей служит для сравнения указанных составляющих на основе отношения

$$m = \frac{\delta_c}{\delta^{\circ}}. \quad (3.37)$$

Если отношение $m < 0,8$, то систематическую погрешность считают пренебрежимо малой по сравнению со случайной, а границу суммарной

погрешности принимают равной доверительной границе случайной погрешности.

Если же $m > 8$, то случайную погрешность считают пренебрежимо малой по сравнению с систематической, а границу суммарной погрешности принимают равной систематической погрешности.

Если отношение $0,8 < m < 8$, то необходимо учитывать обе составляющие, причем их суммирование обычно выполняют по формуле

$$\delta_{\Sigma} = K(\delta_c + \overset{o}{\delta}), \quad (3.38)$$

где коэффициент K принимает значения от 0,7 до 0,85 в зависимости от значения m .

3. Измерение с приближенным апостериорным оцениванием погрешностей отличается от изложенного варианта тем, что данные обрабатываются на основе априорных сведений об условиях измерений и о методических погрешностях, а также на основе взятых из документации сведений о характеристиках СИ. Кроме того, иногда оцениваются (но не измеряются) важнейшие влияющие величины. Основное отличие от предыдущего варианта обработки данных заключается в том, что поправка в результат измерения не вносится, а потому имеется возможность лишь оценить погрешность измерения. Однако при апостериорном оценивании результат измерения все же известен, а границы значений влияющих величин определены точнее (по сравнению с априорным оцениванием), благодаря чему можно получить уточненные оценки погрешностей.

В данном случае, как правило, личная погрешность пренебрежимо мала (по сравнению с инструментальной), а методическая погрешность оценена и учтена заранее, так что задача сводится к оцениванию инструментальной погрешности. Пределы допускаемой основной погрешности Δ_o содержатся в документации на СИ. Пределы для дополнительных погрешностей $\Delta_{донH}$ и $\Delta_{донB}$ определяются на базе нижних и верхних границ влияющих величин.

Суммирование погрешностей осуществляется аналогично предыдущему варианту.

4. Измерения с априорным оцениванием погрешностей (технические) отличаются от рассмотренных тем, что при их подготовке и проведении особенно важна априорная информация. Прежде всего необходимо определить диапазон возможных значений измеряемой величины, а процедура вычисления границ погрешностей, в принципе, остается прежней.

Отметим, что при априорном оценивании приходится рассчитывать погрешность в наименее благоприятной точке диапазона возможных значений измеряемой величины, поэтому оценка погрешности неизбежно получается завышенной. Если известна дополнительная информация о возможных значениях измеряемых величин, ее целесообразно использовать, чтобы получить не столь завышенную оценку погрешности. Изложенное наглядно раскрывает специфику метрологических задач: вычисление результата измерения оказывается довольно простым, а основная задача сводится к оцениванию погрешностей. Отметим, что для более сложных категорий измерений методы обработки оказываются более сложными, главным образом, за счет своих вычислительных аспектов, в то время как характерные для метрологии методы оценивания систематических погрешностей остаются практически неизменными.

3.4.3. Погрешности результатов косвенных измерений

При косвенных измерениях исходными данными являются ряды результатов прямых измерений аргументов, входящих в математическую функцию связи косвенного результата измерений с аргументами. Эти ряды предварительно обрабатываются по методике для обработки результатов наблюдений при прямых измерениях [12]. При этом определяются результаты прямых измерений, показатели их точности и законы распределения случайных погрешностей измерений.

Обработка результатов наблюдений при косвенных измерениях состоит из следующих этапов:

- проверяется отсутствие корреляционной связи между результатами измерений каждой пары аргументов;
- вычисляется результат косвенного измерения по известной математической зависимости (3.39);
- находятся оценки неисключенных систематических и случайных составляющих погрешностей результата косвенных измерений;
- определяется доверительная вероятность, в которой найдена погрешность результата косвенного измерения.

При косвенных измерениях для вычисления погрешностей исходят из предположений. Допустим, что искомая величина W определяется непосредственно измеряемыми величинами – аргументами $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, с которыми она связана известной функциональной зависимостью

$$W = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n), i = \overline{1, n} \quad (3.39)$$

и аргументы не коррелированы.

Если величины X_i измерены и найдены систематические погрешности их измерения Δ_i , то величина W будет найдена с некоторой погрешностью Δ_W и при этом

$$W \pm \Delta_W = f(X_1 \pm \Delta_1, \dots, X_i \pm \Delta_i, \dots, X_n \pm \Delta_n). \quad (3.40)$$

Полагая, что погрешности по сравнению с самими измеряемыми величинами пренебрежимо малы (на два и более порядка), функцию (3.40) можно разложить в ряд Тейлора, ограничиваясь первыми производными:

$$W \pm \Delta_W = f(X_1, \dots, X_n) \pm \frac{\partial f}{\partial X_1} \Delta_1 \pm \dots \pm \frac{\partial f}{\partial X_n} \Delta_n,$$

или для погрешности Δ_W :

$$\pm \Delta_W = \pm \frac{\partial f}{\partial X_1} \Delta_1 \pm \dots \pm \frac{\partial f}{\partial X_i} \Delta_i \pm \dots \pm \frac{\partial f}{\partial X_n} \Delta_n = \sum_{i=1}^n \pm \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \Delta_i \right) = \sum_{i=1}^n \pm (c_i \Delta_i), \quad (3.41)$$

где c_i - коэффициент влияния X_i на W .

Для относительного значения погрешности косвенных измерений справедливо выражение

$$\pm \delta_w = \sum_{i=1}^n \pm \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \frac{X_i}{W} \delta_i \right) = \sum_{i=1}^n \pm C_i \delta_i, \quad (3.42)$$

где C_i - коэффициент влияния X_i на W с учетом отношения $\frac{X_i}{W}$.

Члены алгебраической суммы (3.41) и (3.42) получили название частных погрешностей косвенных измерений: они зависят от коэффициентов, оценивающих влияние каждого аргумента на искомую величину, определяемую при косвенных измерениях W , т. е. от $\frac{\partial f}{\partial X_i}$, и от погрешности его измерения Δ_i .

Зависимостями (3.41) и (3.42) можно пользоваться при определении неисключенных систематических составляющих погрешностей косвенных измерений.

3.4.4. Погрешности результатов совокупных и совместных измерений

В практике измерений встречаются случаи, когда искомые величины не могут быть измерены непосредственно или представлены как явные функции непосредственно измеряемых величин. В таких случаях измеряют величины, функционально связанные с искомыми величинами, а значения их рассчитывают по системе неявных уравнений

$$F_j(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}, y_1, y_2, \dots, y_k) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (3.43)$$

где F_j – символ функциональной зависимости между величинами в j -м опыте;

$x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}$ – результаты измерений непосредственно измеряемых величин X_1, X_2, \dots, X_n в j -м опыте;

y_1, y_2, \dots, y_k – искомые значения измеряемых величин Y_1, Y_2, \dots, Y_k .

Если Y_1, Y_2, \dots, Y_k и X_1, X_2, \dots, X_n являются величинами разного рода, измерения, описываемые в (3.43), называются совместными. Если же все эти величины являются однородными, измерения называются совокупными.

После подстановки в исходную систему уравнений результатов x_{ij} прямых или косвенных измерений она принимает вид

$$F_j(y_1, y_2, \dots, y_k) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3.44)$$

Эти уравнения не являются точным отражением истинного соотношения между искомыми значениями y_1, y_2, \dots, y_k , так как они отягощены погрешностями результатов измерений x_{ij} . Поэтому их называют условными. Общий метод решения таких систем уравнений заключается в следующем. Среди бесконечного множества возможных решений этой системы (а число решений будет бесконечным при $m > k$) находится некое наилучшее решение $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_k$. Если это решение подставить в условные уравнения, то вследствие неопределенностей результатов измерений x_{ij} правые части уравнений будут отличаться от левых частей. Для получения тождеств нужно записать

$$F_j(y_1, y_2, \dots, y_k) + v_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (3.45)$$

где v_j – остаточные погрешности условных уравнений, называемые невязками.

В соответствии с принципом Лежандра искомые уравнения имеют наиболее достоверное решение, если сумма квадратов всех невязок будет минимальной:

$$\sum_{j=1}^m v_j^2 = \min. \quad (3.46)$$

Решение условных уравнений по принципу Лежандра называется методом наименьших квадратов. Из (3.46) следует, что полный дифференциал должен равняться нулю:

$$d\left(\sum_{j=1}^m v_j^2\right) = \frac{\partial\left(\sum_{j=1}^m v_j^2\right)}{\partial\bar{y}_1} d\bar{y}_1 + \frac{\partial\left(\sum_{j=1}^m v_j^2\right)}{\partial\bar{y}_2} d\bar{y}_2 + \dots + \frac{\partial\left(\sum_{j=1}^m v_j^2\right)}{\partial\bar{y}_k} d\bar{y}_k = 0.$$

В свою очередь, это равенство будет выполняться при любых значениях дифференциалов $d\bar{y}_i$ только тогда, когда будут справедливы уравнения

$$\frac{\partial\left(\sum_{j=1}^m v_j^2\right)}{\partial\bar{y}_i} = 0, \quad i = 1, \dots, k. \quad (3.47)$$

Система (3.47) называется системой нормальных уравнений. Она состоит из k уравнений относительно k неизвестных и дает единственное решение искомых значений \bar{y}_i величин Y_i .

При решении этой задачи в общем случае, при нелинейных условных уравнениях и коррелированных результатах отдельных измерений возникает ряд непреодолимых трудностей. Поэтому на практике всегда стараются привести нелинейные условные уравнения к линейному виду тем или иным способом. Один из наиболее распространенных способов заключается в замене неизвестных так, чтобы условные уравнения были линейными относительно новых искомых величин. Другой способ — разложение нелинейной функции в ряд Тейлора с отбрасыванием нелинейной части ряда.

3.5. Суммирование погрешностей

Задача суммирования погрешностей измерений возникает во многих случаях на практике, в том числе при определении погрешностей результатов измерений, вычислении погрешностей средств измерений, каналов информационно-измерительных систем и т.п. Иначе говоря, задача

суммирования погрешностей появляется как при постановке и проведении измерений, так и при проектировании и использовании измерительных устройств.

Трудности определения результирующих погрешностей измерений заключаются в том, что погрешности измерений, характеризуемые не исключенными систематическими и случайными составляющими, должны рассматриваться как случайные величины и могут быть представлены соответствующими многомерными законами распределений. При переходе к числовым характеристикам этих законов должен учитываться ряд обстоятельств.

Числовые характеристики законов распределения погрешностей могут зависеть от значений самой измеряемой величины, поэтому в дальнейшем погрешности делят на аддитивные (не зависящие от X) и мультипликативные (зависящие пропорционально от X). Эти погрешности должны быть выделены и их суммирование осуществляется отдельно.

Отдельные составляющие погрешностей могут быть коррелированы между собой. Эти связи между суммируемыми составляющими погрешности должны быть учтены.

Согласно теории вероятностей, среднеквадратическое отклонение двух коррелированных случайных величин определяется выражением

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + 2\rho\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}, \quad (3.48)$$

где ρ — коэффициент корреляции $\rho = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}$.

Если эти величины не коррелированы, то $\rho = 0$ и $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$. Если величины связаны линейной зависимостью и $\rho = \pm 1$, то с учетом знака

$$\sigma_{\Sigma} = |\sigma_1 \pm \sigma_2|.$$

Пользуясь методами теории вероятностей, можно рекомендовать следующее правило определения результирующих погрешностей:

1. При вычислении значений результирующей погрешности измерений

(или измерительных устройств) исходными данными следует считать составляющие погрешностей отдельных измерительных операций (или составных частей устройств) при разделении их в соответствии с классификацией, приведенной в табл.3.1. Причем важнейшим основанием для их разделения является учет взаимных корреляционных связей между составляющими отдельных операций или частей. Кроме того, должны быть выделены аддитивные и мультипликативные составляющие погрешности для их последующего раздельного суммирования.

2. Так как суммирование случайных составляющих погрешностей с учетом корреляционных связей возможно производить, зная дисперсию или среднеквадратическое значение, то все составляющие погрешностей должны быть выражены в среднеквадратических значениях. Неисключенные систематические погрешности ввиду неизученности действия нескомпенсированных влияющих факторов для целей анализа результативной погрешности могут также быть отнесены к случайным составляющим погрешностей и оцениваться среднеквадратическим значением. Примером может служить температурная погрешность измерений и средств измерений, которая будучи хорошо изученной, количественно оцененной и являющаяся систематической составляющей, проявляется случайным образом из-за случайного воздействия самой температуры на отдельные измерительные операции, средства измерений или их элементы. Главным с точки зрения анализа результирующей температурной составляющей погрешности является выявление степени зависимости температурного влияния на отдельные операции или элементы.

3. При изучении корреляционных связей между отдельными составляющими результирующей погрешности следует выделить две группы составляющих погрешности: сильнокоррелированные, к ним практически следует отнести те, связь между которыми оценивается коэффициентом корреляции $\rho = 1 \div 0,7$, и слабокоррелированные при коэффициенте их корреляции $\rho = 0,7 \div 0$.

4. Для группы сильнокоррелированных погрешностей, считая, что $\rho = \pm 1$ производят алгебраическое суммирование составляющих погрешностей. Слабокоррелированные погрешности (условно принимают $\rho = 0$) суммируют по правилу геометрического сложения $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}$. Далее окончательное среднеквадратическое значение результирующей погрешности вычисляют как геометрическую сумму среднеквадратических сильно- и слабокоррелированных составляющих погрешностей. Для представления погрешности результата или средства измерения необходимо изучить композицию законов распределения составляющих погрешности. Правда, для большинства практических задач закон распределения результирующей погрешности можно принять нормальным и на этом основании определить доверительное значение $\pm \Delta_d$ (или квантильную оценку) погрешности и указать доверительную вероятность P_d [19].

Глава 4. Метрологические характеристики СИ и их нормирование

4.1. Метрологические характеристики средств измерений

Метрологические характеристики СИ и, в том числе, измерительных преобразователей (ИП) – это характеристики свойств СИ, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений, производимых с помощью средств измерений.

1. **Функция преобразования или номинальная статическая характеристика СИ.** В СИ добиваются того, чтобы из всего множества действующих на него физических величин только одна, являющаяся естественной входной физической величиной, преобразовывалась в выходную в соответствии с конкретной функциональной зависимостью $Y=f(X)$. Эта зависимость определяется аналитическим выражением или представляется графиком или таблицей и называется статической номинальной характеристикой СИ (ИП). Обычно стремятся иметь линейную характеристику, т. е. прямую пропорциональность между выходной и входной величинами.

Для получения линейной характеристики СИ достаточно определения двух параметров: начального значения выходной величины Y_0 (нулевого уровня), соответствующего, например, нулевому значению входной величины X_0 , и величины $S = K = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$, называемой чувствительностью преобразователя (коэффициентом преобразования). Для линейного преобразования $S = \text{const}$ (рис.4.1).

Чувствительность СИ — это, как правило, именованная величина, имеющая размерность, зависящую от размерности входной и выходной величин: для реостатного преобразователя — Ом/мм, для термопары — мВ/°С, для термометра электрического сопротивления — Ом/°С и т. д.

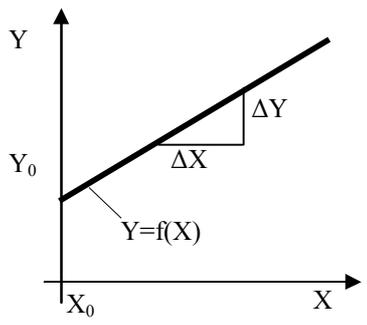


Рис.4.1. Линейная характеристика СИ

Иногда СИ (ИП) осуществляют квадратичное, логарифмическое или другое нелинейное функциональное преобразование входной величины в выходную. Тогда чувствительность не остается постоянной для всего диапазона изменения X , т. е. $S=var$.

На рис. 4.2 изображены наиболее часто встречающиеся типы нелинейных характеристик СИ. Они указывают на наличие: гистерезиса, механического трения, люфта (рис. 4.2, а); насыщения, ограничения, упора (рис. 4.2, б); области $-X_0 < X < +X_0$ при $Y=0$, т. е. зоны нечувствительности в области нуля (рис. 4.2, в).

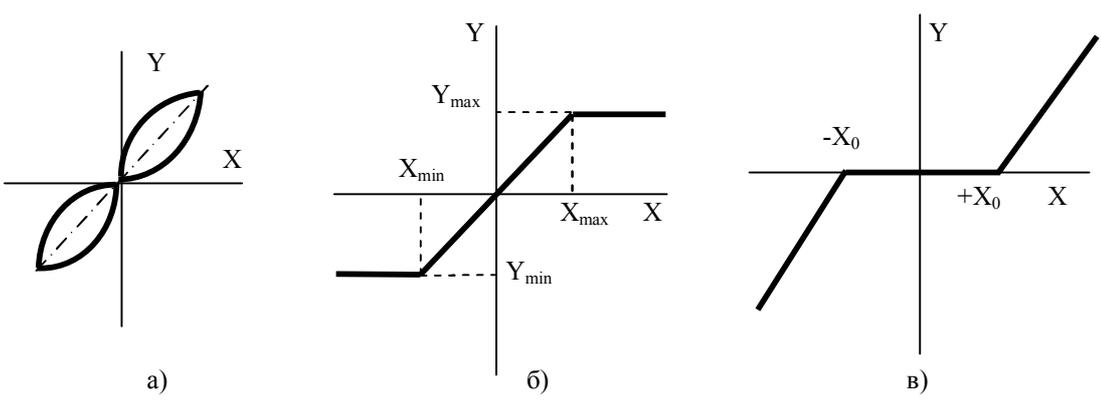


Рис.4.2. Типы нелинейных характеристик СИ

Чувствительность измерительного устройства S (коэффициент преобразования), состоящего из последовательного ряда измерительных

преобразователей, определяется произведением чувствительности всех преобразователей, образующих канал передачи информации:

$$S = S_1 S_2 S_3 \dots S_i \dots S_n = \prod_{i=1}^n S_i$$

где n – число преобразователей, S_i – чувствительность (коэффициент преобразования) i -го ИП.

Достаточно одному преобразователю в этой последовательности иметь нелинейную характеристику и функция преобразования измерительного устройства также будет нелинейной. Этим обстоятельством пользуются для коррекции характеристики преобразования измерительного устройства включением в него измерительных преобразователей, имеющих противоположный характер нелинейности.

2. Пределы преобразования. Верхний предел преобразования данного СИ – это максимальное значение входной величины X_{\max} , которое еще может быть им воспринято без искажения и повреждения СИ. Нижний предел преобразования, или порог чувствительности, – это минимальное изменение значения входной величины X_{\min} , которое можно уверенно обнаружить с помощью СИ.

Для уточнения количественного значения порога чувствительности используют следующие соображения. Так как при любом измерении интересуются в конечном итоге относительной погрешностью результата измерения $\delta = \pm \frac{\Delta}{X} 100 \%$, то определяют X_{\min} значением входной величины, относительная погрешность измерения которой не превышает $\delta = \pm 100 \%$, т. е. дает возможность уверенно обнаружить ее на входе измерительного устройства. Это значит, что $X_{\min} = \pm \Delta$, измеряемая с погрешностью $\delta = \pm 100 \%$.

3. Динамический и рабочий диапазоны. Наиболее характерным показателем качества СИ является отношение, называемое полным или

динамическим диапазоном СИ

$$D_D = \frac{X_{\max}}{X_{\min}}. \quad (4.1)$$

Действительно, добавляя к основному преобразователю СИ предварительный преобразователь (например, рычажную передачу, редуктор, делитель напряжения для электрических преобразователей, умножитель частоты для цифровых СИ и т. д.), естественный верхний предел измерения X_{\max} можно изменять и согласовывать с пределом изменения измеряемой величины. При этом в то же число раз изменяется и порог чувствительности СИ X_{\min} .

Для каждого типа СИ существует практический предел достижимых величин D_D , определяемый принципом действия и качеством элементов СИ. Расширение полного диапазона за этот предел требует очень больших конструкторских и технологических усилий. В полном диапазоне D_D относительная погрешность измерения доходит до $\pm 100\%$, поскольку $X_{\min} = \Delta$. В связи с этим в области, близкой к порогу чувствительности, относительная погрешность достигает очень больших значений, нежелательных в измерительной практике, поэтому для характеристики реального диапазона измерения физических величин используется понятие рабочего диапазона.

Рабочим диапазоном СИ называют диапазон измеряемых величин, в котором относительная погрешность не превышает заданного допустимого значения δ_D :

$$D_D = \frac{X_{\max}}{X_{\delta \leq \delta_D}}. \quad (4.2)$$

Относительная ширина рабочего диапазона меньше динамического и зависит от значения погрешности δ_D и характера изменения основной погрешности вдоль шкалы прибора.

Большинство технических средств измерения в качестве нормированной величины погрешности имеет приведенное ее значение $\gamma = \frac{\Delta \cdot 100}{X_N}$, где

$X_N = X_{\max} - X_{\min}$ для большинства СИ. Нетрудно показать, что в этом случае рабочий диапазон прибора равен отношению, если $X_{\min} = 0$:

$$D_D = \frac{X_{\max}}{X_{\delta \leq \delta_D}} = \frac{\delta_D}{\gamma}, \quad (4.3)$$

так как $X_{\delta \leq \delta_D} = \frac{\Delta \cdot 100}{\delta_D} = \frac{\gamma \cdot X_{\max}}{\delta_D}$.

4. Мощность СИ. В измерительном процессе существенное значение имеет мощность СИ. При этом влияние мощности на погрешность результата измерения должна рассматриваться с двух позиций. С одной стороны, очевидно, что влияние помех, шума и дрейфа на выходную величину СИ тем меньше, чем больше мощность его выходного сигнала. С другой стороны, такое СИ потребляет и большую мощность на входе. В результате этого воздействие помех на выходной сигнал уменьшается, но увеличивается влияние СИ на объект измерения, в силу чего появляется методическая погрешность. В итоге измеряется не то значение измеряемой величины, которое действительно существовало в объекте измерения до подключения к нему СИ, а то искаженное значение, которое возникало в результате нагрузки объекта средством измерения.

Так, для измерения разности потенциалов в рН-метрах без искажения электродных потенциалов, возникающих на границе электрод – раствор, следует пользоваться прибором для измерения напряжения с бесконечно большим входным сопротивлением. Это позволит уменьшить до весьма малого значения ток, который протекает по раствору и входному сопротивлению стеклянного измерительного электрода под действием измеряемой разности потенциалов.

5. **Входной и выходной импеданс.** Взаимодействие СИ с предыдущим источником сигнала характерно для всех преобразователей, используемых в приборах для измерения физических величин. Параметром, характеризующим указанное свойство, является обобщенное входное сопротивление СИ. В соответствии с ГОСТ 8.009 — 72 эта характеристика получила название входного импеданса СИ $Z_{вх}$. Он определяется отношением обобщенной силы, действующей на входе СИ, к обобщенной скорости, характеризующей процессы во входной цепи СИ. Размерность величины обобщенного входного импеданса $Z_{вх}$ может быть самой разнообразной и зависит от вида входной величины СИ. Особенно важно, чтобы большое $Z_{вх}$ имело самое первое СИ. Этим обеспечивается малая зависимость характеристик прибора от свойств объекта измерения, часто неизвестных и непостоянных во времени. Например, чтобы показания поплавкового уровнемера не зависели от плотности жидкости, поплавок должен быть очень легким и подвижным.

Способность выходной цепи СИ противостоять нагрузке, создаваемой последующими преобразователями, характеризуется обобщенным выходным сопротивлением. В соответствии с ГОСТ 8.009–72 этот параметр СИ назван выходным импедансом $Z_{вых}$ и определяется как реакция его выходного сигнала на подключение к его выходу фиксированной нагрузки. Взаимная зависимость характеристик двух преобразователей, стоящих рядом в цепи преобразования, тем меньше, чем меньше импеданс $Z_{вых}$ предыдущего преобразователя и чем больше $Z_{вх}$ последующего. С точки зрения максимальной передачи энергии сигналов от одного СИ к другому необходимо соблюдать равенство $Z_{вых} = Z_{вх}$.

6. **Погрешности СИ. Основные погрешности.** Под основными погрешностями СИ понимают те, которые присущи им в нормальных или номинальных условиях эксплуатации. При попытке экспериментально определить характеристику преобразования, например при градуировке СИ, получают ряд точек более или менее близких к прямой линии, к параболе или

к другой предполагаемой характеристике, определяющей зависимость $Y = f(X)$. При повторной градуировке получается другой ряд точек, не совпадающих с первоначальным. Это обстоятельство заставило ввести понятие нормальной градуировочной характеристики преобразования, т. е. характеристики, которая приписывается СИ, указывается в его паспорте и используется при производстве измерений с участием этого СИ. Отклонения реальной характеристики преобразования от номинальной являются погрешностями СИ. По характеру их проявления можно выделить несколько составляющих погрешностей в нормальных или номинальных условиях эксплуатации при неизменном (в пределах оцениваемых значений погрешности СИ) значении входной величины на каждой градуировочной точке, которые систематизированы ниже.

Систематическое отклонение реальной характеристики $Y = f_r(X)$ от номинальной градуировочной $Y = f_n(X)$ (линейной, квадратичной и т.д.). Примером такой погрешности является погрешность, вызванная нелинейностью функциональной зависимости $Y = f_p(X)$ при попытке ее линеаризации. Закон ее изменения вдоль шкалы (в зависимости от X) известен, и эту погрешность можно учесть при получении результата, измерения, если известна таблица поправок для каждой точки шкалы. Неудобства такого (табличного) способа учета погрешности очевидны. Поэтому в современных технических средствах измерений, если необходимо учитывать известные систематические погрешности, используют средства вычислительной техники для автоматического введения соответствующих поправок в каждый результат измерения. В противном случае погрешность нелинейности обеспечивают достаточно малой по величине, а проявляется и оценивается она как случайная составляющая погрешности СИ.

Отклонения, вызванные неоптимальным выбором точек предполагаемой градуировочной характеристики измерительного устройства. Погрешность градуировки связана как с конечной точностью

измерения образцового значения X и Y , так и со способом передачи градуировочных значений f_r измерительному преобразователю (например, со способом нанесения шкалы и ее использования). Эта погрешность имеет систематическую и случайную составляющие.

Зависимость характеристики преобразования СИ от направления (увеличения или уменьшения) изменения входной величины, порождающая погрешность вариации. Эта погрешность связана с наличием механического, теплового, электрического и магнитного гистерезиса, она имеет систематическую и случайную составляющие.

Случайные неповторяющиеся отклонения отдельных точек характеристики преобразования (полученных в одинаковых условиях), вызванные наличием помех, шумов во всех элементах измерительных устройств. Посторонние возмущения вне зависимости от места их приложения – на входе сигнала, в процессе его преобразования или на выходе – служат причиной появления неопределенности результата измерения. Эта составляющая погрешности СИ является случайной.

Все рассмотренные составляющие погрешностей имеются даже при самых благоприятных нормальных (или номинальных) условиях работы СИ. Поэтому даже для этих условий эксплуатации каждое СИ характеризуется наличием систематической составляющей Δ_c , случайной составляющей $\overset{\circ}{\Delta}$ погрешности и суммарной погрешности Δ . Кроме того, для ряда СИ отдельно указывается вариация показаний Δ_v . Для большинства технических средств измерения все систематические составляющие погрешности структурным, схемным, конструктивным или технологическим путем уменьшаются по размеру до уровня случайных составляющих погрешностей и при их определении пользуются оценками, приведенными в гл.3.2 или рекомендованными ГОСТами. Погрешность вариации Δ_v , как правило, не должна превышать суммарную погрешность измерительного устройства Δ . Все перечисленные составляющие погрешностей средств измерения носят

название основных статических погрешностей, как погрешностей, присущих средству измерения в нормальных условиях эксплуатации при неизменном значении измеряемой или входной величины во времени.

При отклонении условий эксплуатации СИ от нормальных или номинальных появляются так называемые дополнительные погрешности. Это составляющие погрешности СИ, возникающие дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения внешних влияющих величин (ВВВ) от нормальных или номинальных их значений или вследствие их выхода за пределы нормальных или номинальных областей их значений [4].

К числу таких ВВВ, вызывающих появление дополнительных погрешностей, относятся изменение напряжения питания, изменение температуры, появление или искажение электромагнитного поля, вибрации и т. п. Поскольку полной независимости от посторонних факторов добиться невозможно, задача проектирования СИ состоит в том, чтобы по возможности уменьшить чувствительность его к влияющим факторам и увеличить чувствительность к измеряемой величине. Существующие правила определения и нормирования дополнительных погрешностей средств измерений предполагают указание нормальной и расширенной области значений ВВВ для каждого типа СИ.

Как основные, так и дополнительные погрешности СИ относятся к статическим погрешностям, т.е. таким, когда СИ применяется при измерении физической величины, принимаемой во времени за неизменную [16].

Метрологические характеристики СИ в динамических режимах объясняются как инерционностью самих измерительных устройств, так и особенностями физических процессов, развивающихся во времени, параметры которых измеряются этими средствами.

Известно, что инерционность СИ отрицательно сказывается на точность результатов измерений. Поэтому для каждой измерительной задачи особенно важен анализ свойств объекта и измерительных устройств с точки зрения согласования их динамических характеристик.

В средствах измерения отмечают также свойство стабильности и нестабильности, т.е. способность сохранять неизменными или не сохранять неизменными за установленный интервал времени соответственно их метрологические характеристики [19].

Изменения характеристик СИ связаны с процессами старения, т.е. с процессами стабилизации внутренних структур материалов, со снятием и рассеянием внутренних напряжений, с процессами сорбции и диффузии, с химическими реакциями, высыханием, растрескиванием, полимеризацией, усталостью и т. п. и представляют собой случайные функции времени. В среднем эти процессы достаточно длительны и монотонны.

Изменения характеристик СИ приводят к нестабильности их метрологических характеристик во времени. Это свойство оценивается погрешностью нестабильности средств измерения. Последняя не должна превышать определенного предела в течение заданного времени при конкретных условиях эксплуатации, режимах работы и обслуживании СИ, т.е. обеспечивать метрологическую надежность СИ [1]. Такими пределами являются границы допускаемых значений основных статических погрешностей измерительных устройств, соответствующие классам точности средств измерения. При выпуске средств измерения заводом-изготовителем первоначальные значения основных статических погрешностей в 1,5—3 раза меньше, чем нормированные, характеризуемые классами точности. С течением времени основные статические погрешности увеличиваются из-за нестабильности устройств и может наступить момент, когда погрешности превысят допускаемые для них границы, т.е. средство измерения теряет свою метрологическую исправность. Для обнаружения в СИ такого рода погрешностей используют операции поверки или калибровки (см.гл.2.2 и п.7.2) измерительных устройств, т.е. операции сравнения показаний контролируемых средств измерения с образцовыми для определения их погрешностей. Необходимость контроля метрологической исправности, который может быть произведен только в результате периодической поверки

или калибровки, делает средства измерения особым классом технических устройств. Поверки или калибровки применяют как для определения пригодности приборов для дальнейшей их эксплуатации, так и для аттестации приборов при выпуске заводом-изготовителем. Основной парк приборов эксплуатируется длительное время, в течение которого они подвергаются многократным поверкам или калибровкам и в случае необходимости восстановлению – ремонтам, регулировкам и градуировкам.

Сроки этих операций, т.е. межповерочные периоды или интервалы, оговариваются, как правило, в нормативной документации или в ГОСТах на типы конкретных приборов. Однако эти сроки не всегда обоснованы (расчетами или экспериментальными данными): часто при поверке или калибровке приборы оказываются негодными, иногда приборы поверяются задолго до потери ими метрологической исправности. Такое положение при неоправданных затратах не позволяло гарантировать метрологическое обеспечение производимых измерений.

В настоящее время изучением поведения средств измерения во времени, характера потерь их метрологической исправности, закономерностей появления метрологических отказов занимается раздел теории и практики надежности измерительных устройств [1]. Впервые теоретические и экспериментальные исследования надежности свойств измерительной техники обеспечивают количественную оценку надежности средств измерения не только с учетом внезапных, но главное, и постепенных отказов из-за нестабильности характеристик во времени, т. е. количественное определение погрешности нестабильности средств измерения, а также прогнозирование изменения характеристик измерительных устройств для обоснованного выбора межповерочных периодов, т. е. обеспечения метрологической исправности средств измерения при эксплуатации.

Кроме того, изучение надежности средств измерения позволяет разработать пути повышения надежности и качества измерительной техники и создать основы квалиметрии измерительных устройств [20].

4.2. Модели изменения погрешности вдоль функции преобразования

Совместное воздействие всех рассмотренных выше факторов приводит к тому, что характеристика реальных преобразователей оказывается неоднозначной и на графике из линии превращается в полосу неопределенности. Половина ширины полосы неопределенности принимается за основную абсолютную погрешность преобразователя.

Изменение ширины полосы неопределенности вдоль характеристики преобразования может иметь различный характер. Если ширина полосы неопределенности может оставаться постоянной на всем диапазоне изменения характеристики СИ, как показано на рис. 4.3 а, ее значение составляет $\Delta X = 2\Delta_0$. В этом случае погрешность СИ Δ_0 называется **погрешностью нуля** или **аддитивной**. Она не зависит от текущего значения измеряемой величины. В другом случае ширина полосы неопределенности (рис.4.3 б) возрастает пропорционально текущему значению измеряемой величины X и равна $\Delta X = 2\delta_S X$. Такая абсолютная погрешность $\delta_S X$ называется **погрешностью чувствительности** или **мультипликативной**. В большинстве реальных измерительных приборов и преобразователей аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности присутствуют одновременно, в результате чего полоса погрешностей распределяется вдоль характеристики преобразования или СИ так, как показано на рис. 4.3 в.

В последнем случае текущая ширина такой полосы неопределенности, а следовательно, и изменение текущей погрешности преобразования вдоль возможных значений величины X могут быть определены формулой

$$\Delta X = 2\Delta = 2(\Delta_0 + \delta_S X),$$

где Δ_0 – абсолютная погрешность нуля прибора или преобразователя; δ_S – относительная погрешность чувствительности прибора или преобразователя; X – текущее значение преобразуемой или измеряемой величины.

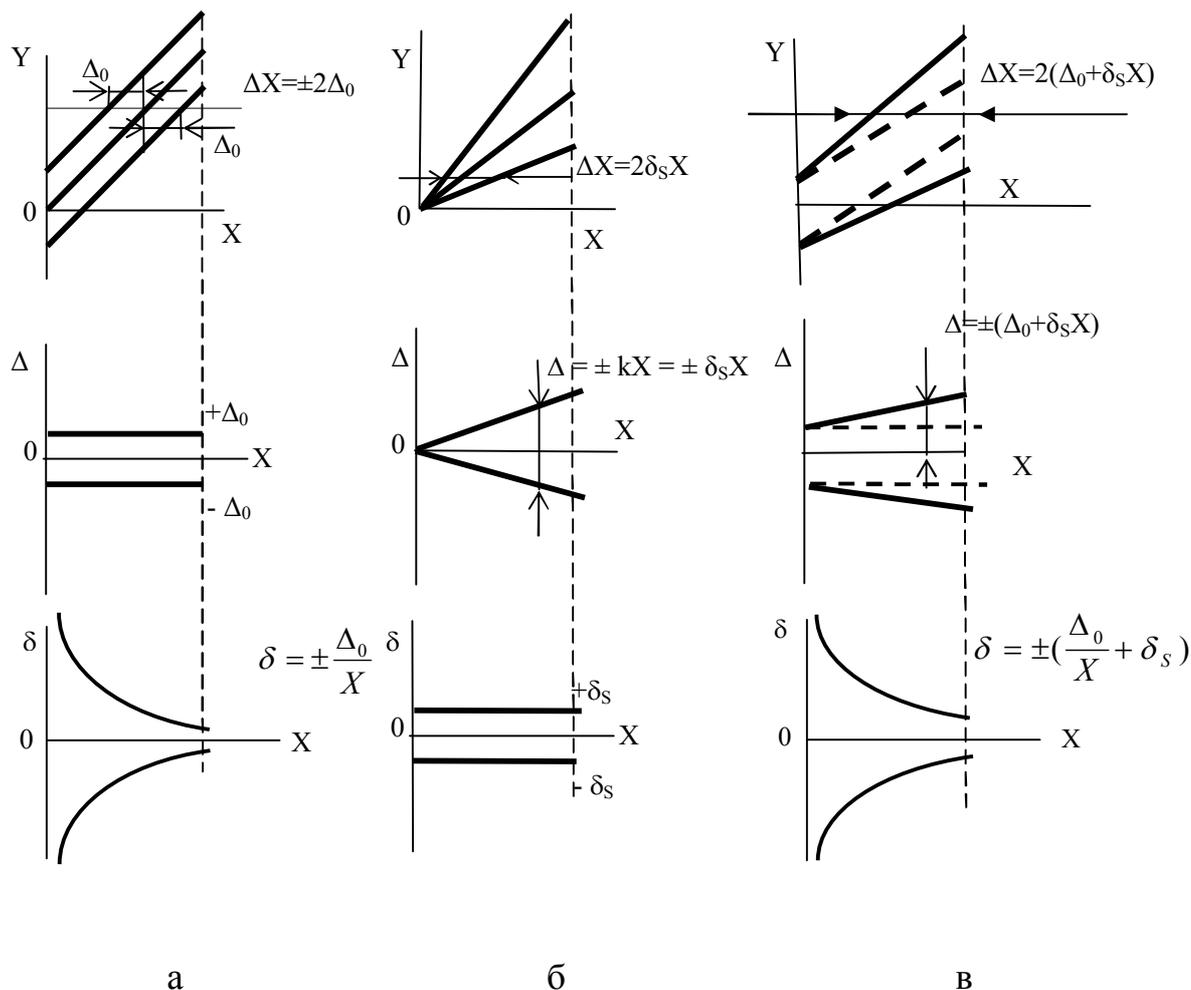


Рис.4.3. Зависимости изменения погрешностей вдоль функции преобразования

На рис. 4.3 а, 4.3 б, в приведены также зависимости изменения относительных погрешностей СИ вдоль функции преобразования. Из этих графиков следует, что в первом случае относительная погрешность существенно зависит от измеряемой величины $\delta = \frac{\Delta_0}{X}$ и является мультипликативной. На рис.4.3 б относительная форма погрешности приводит к ее постоянству вдоль $y = f(x)$, т.е. $\delta = \frac{\delta_s \cdot X}{X} = \delta_s$, т.е. относительная погрешность аддитивна.

В третьем случае имеется аддитивная и мультипликативная составляющая погрешности: $\delta = \frac{\Delta_0}{X} + \delta_s$.

Разделение погрешности приборов и преобразователей на погрешности нуля и чувствительности и нормирование погрешностей отдельным указанием этих двух составляющих (аддитивной и мультипликативной) чрезвычайно важны. Такое нормирование основных статических погрешностей СИ принято в ГОСТ 8.401 – 80.

4.3. Нормирование метрологических характеристик средств измерений

Нормирование МХ СИ необходимо для решения трех основных задач:

- 1 - контроля каждого экземпляра СИ на его соответствие установленным нормам для обеспечения определенного качества измерений;
- 2 - определение результата измерения и априорного оценивания инструментальной погрешности СИ;
- 3 - оценки апостериорной погрешности технического СИ с учетом условий его применения по известным нормированным погрешностям (классу точности) этого средства.

Наиболее детальные правила нормирования МХ СИ и их номенклатура установлены в [15].

Следует иметь в виду, что метрологические свойства каждого конкретного экземпляра СИ в определенный момент времени постоянны, но по совокупности СИ данного типа они изменяются случайным образом. Это происходит вследствие рассеивания технологических параметров при изготовлении СИ, различия условий эксплуатации, приводящего к случайному характеру процессов износа и старения его элементов, случайной погрешности измерений при периодических калибровках СИ и других аналогичных причин. Поэтому теоретически возможны нормируемые

метрологические характеристики двух видов. К характеристикам первого вида, почти исключительно применяемым на практике, относятся пределы допускаемых значений метрологических характеристик СИ данного типа. Их используют как при контроле годности каждого экземпляра СИ, так и для оценки максимально возможной инструментальной погрешности результата измерения. К характеристикам второго вида, применяемым крайне редко, относятся математическое ожидание и СКО значений метрологической характеристики, вычисленные по совокупности СИ данного типа, пригодные для оценивания инструментальной погрешности измерений методом статистического суммирования.

При нормировании МХ для технических СИ в основном используется, как указано выше, назначение пределов допускаемых значений погрешностей СИ, т.е. в соответствии с [16] присвоение СИ определенного класса точности. Под классом точности СИ понимается обобщенная МХ, определяющая метрологические свойства СИ. Он включает в себя систематическую и случайную составляющие погрешности и характеризует не точность определяемого результата измерений, а его инструментальную составляющую погрешности, так как полная погрешность результата измерения зависит от методической погрешности и погрешности интерпретации (см.гл.3.1).

Определяя класс точности, нормируются прежде всего пределы допускаемой основной погрешности $\delta_{\text{осн}}$. Пределы допускаемой дополнительной погрешности устанавливаются в виде долевого (кратного) значения основной погрешности.

Классы точности присваиваются СИ при их разработке по результатам государственных приемочных испытаний. Если СИ предназначены для измерения одной и той же физической величины, но в разных диапазонах, или – для измерения разных физических величин, то этим СИ могут присваиваться разные классы точности как по диапазонам, так и по измеряемым физическим величинам.

Пределы допускаемых основной и дополнительной погрешностей выражают в форме абсолютной, относительной или приведенной погрешностей. Способ выражения погрешностей зависит от характера изменения погрешности по диапазону измерения, назначения и условий применения СИ.

Если погрешность результатов измерений в данной области измерений принято выражать в единицах измерений величины или делениях шкалы, то принимается форма абсолютных погрешностей (меры, магазины номинальных физических величин, технические ртутные термометры). Если границы абсолютных погрешностей в пределах диапазона измерений практически постоянны, то принимается форма приведенной погрешности, а если эти границы нельзя считать постоянными, то принимается форма относительной погрешности.

Поэтому ГОСТ 8.401—80 в качестве основных устанавливает три вида классов точности СИ:

- для пределов допускаемой абсолютной погрешности в единицах измеряемой величины или делениях шкалы;

- для пределов допускаемой относительной погрешности в виде ряда чисел

$$\delta = \pm A \cdot 10^n, \quad (4.4)$$

где $A = 1; 1,5; (1,6); 2; 2,5; (3); 4; 5$ и 6 ; значения $1,6$ и 3 — допускаемые, но не рекомендуемые; $n = 1; 0; -1; -2; \dots$;

- для пределов допускаемой приведенной погрешности с тем же рядом

$$\gamma = \pm A \cdot 10^n.$$

Абсолютная погрешность Δ должна быть представлена:

- либо одним значением

$$\Delta = \pm a, \quad (4.5)$$

- либо зависимостью, выраженной двучленной формулой

$$\Delta = \pm(a + bX), \quad (4.6)$$

где X — измеряемое значение, показание или сигнал; a и b — постоянные величины;

- либо в виде таблицы пределов допускаемых погрешностей для различных измеряемых значений, показаний или сигналов.

Как следует из формул (4.5) и (4.6) в первом случае СИ имеет абсолютную аддитивную погрешность, (по модели рис.4.3 а), например, погрешность отсчета, а во втором случае в абсолютной погрешности присутствует аддитивная и мультипликативная составляющая по модели рис.4.3 в. Откуда следует, что относительные погрешности δ этого СИ изменяются вдоль функции преобразования в соответствии с зависимостями, приведенными на рис. 4.3 а. Классы точности СИ, выраженные через абсолютные погрешности, обозначаются прописными буквами латинского алфавита или римскими цифрами. При этом, чем дальше буква от начала алфавита, тем больше значения допускаемой абсолютной погрешности. Например, СИ класса А более точен, чем СИ класса С, т.е. это буква – условное обозначение и не характеризует значение погрешности, которое следует определить из нормативных документов на конкретное СИ.

Приведенная погрешность СИ γ [%] нормируется по значению

$$\gamma = \pm \frac{\Delta \cdot 100}{X_N} = \pm p, \quad (4.7)$$

где X_N – нормированное значение измеряемой величины СИ;

p – постоянная из ряда $A \cdot 10^n$ (4.4).

Нормированное значение измеряемой величины СИ назначается следующим образом:

1. $X_N = X_{\max} = X_k$, если $X_{\min} = 0$;
2. $X_N = X_{\max} - X_{\min}$, если 0 на шкале отсутствует (утоплен);
3. $X_N = X_{\max} + X_{\min}$, если 0 в диапазоне шкалы;
4. X_N – указанное на шкале значение измеряемой величины;
5. X_N – указано в нормативных документах на СИ.

Три первых правила можно объединить выражением $X_N = X_{\max} - X_{\min}$ в алгебраическом смысле, т.е. X_N – это длина шкалы в наименьших единицах.

Для СИ с неравномерными шкалами часто нормируется допусковое значение приведенной погрешности, определяемое зависимостью

$$\gamma = \frac{\Delta \cdot 100}{L(\varphi)} = p', \quad (4.8)$$

где L и φ - длина шкалы и градус пространственного угла.

При этом такое значение погрешности указывается для конкретного диапазона шкалы СИ, обозначенного на шкале специальными метками.

Маркировка классов точности СИ по приведенной погрешности осуществляется указанием количественного значения p на шкале СИ в соответствии с размером $A \cdot 10^n$ стандартного ряда.

Обозначение допускаемой погрешности по (4.8) приводится в виде p' , где количественный размер p' также соответствует ряду (4.4).

Использование зависимости (4.7) для конкретного СИ при указании p означает, что у этого СИ имеется только погрешность нуля Δ_0 , т.е. она постоянна вдоль шкалы по модели рис. 4.1 а. При этом относительная погрешность СИ δ мультипликативна, ее значение растет обратно пропорционально X (рис. 4.1 а) и изменяется по гиперболе. При уменьшении

измеряемой величины до $X = \Delta = \frac{\gamma \cdot X_N}{100}$ относительная погрешность результата измерения этой величины составит

$\delta = \pm \frac{\Delta \cdot 100}{X} = \pm \frac{\Delta \cdot 100}{\Delta} = \pm 100$ %. Такое значение измеряемой величины, как указано в р.4.1, называется порогом чувствительности и теоретически определяет X_{\min} и D_d .

У наиболее точных СИ нормируется относительная погрешность δ (%), которая может быть определена по одночленной

$$\delta = \pm \frac{\Delta \cdot 100}{X} = \pm q \quad (4.9)$$

или двухчленной формуле [16]:

$$\delta = \pm \left[c + d \left| \frac{X_K}{X} - 1 \right| \right], \quad (4.10)$$

где q , c и d – постоянные величины из стандартного ряда $A \cdot 10^n$ (4.4);

X_K – конечное значение диапазона измерений СИ или больший по модулю из пределов измерений.

Значения q , c и d округляются в соответствии с принятым рядом (4.4). При нормировании классов точности по относительной погрешности по зависимости (4.9) у СИ имеется только аддитивная относительная составляющая погрешности по модели рис.4.3 б, т.е. присутствует только погрешность чувствительности δ_S . Нормирование классов точности СИ по двухчленной формуле (4.10) присуще средствам, имеющим погрешности нуля $\Delta_0 = \pm a$ и чувствительности $\Delta_S = \pm bX$.

Действительно, если $\Delta = \pm(\Delta_0 + \Delta_S) = \pm(a + bX)$, то

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X} = \pm \left(\frac{a}{X} + b \right). \quad (4.11)$$

Чтобы связать значения относительной погрешности с X_K и получить зависимость $\delta = f(X_K)$, прибавим и вычтем значение $\frac{a}{X_K}$ из выражения (4.11).

Тогда

$$\delta = \pm \left(b + \frac{a}{X_K} - \frac{a}{X_K} + \frac{a}{X} \right). \quad (4.12)$$

Обозначив постоянные значения $\left(b + \frac{a}{X_K} \right) = c = const$ и $\frac{a}{X_K} = d = const$,

получим

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_K}{X} - 1 \right) \right]. \quad (4.13)$$

Зависимость $\delta = f(X_K)$ представлена на рис.4.3в, которая показывает аддитивную относительную составляющую СИ – c и мультипликативную – $d \left| \frac{X_K}{X} - 1 \right|$. Последняя после середины шкалы X_K приводит к значительному увеличению относительной погрешности прибора из-за наличия погрешности нуля $\Delta_0 = \pm a$.

Маркировка значений по форме (4.9) осуществляется указанием его числовых размеров в соответствии с выбранным $A \cdot 10^n$ в кружке \textcircled{q} , которое приводится на шкале СИ.

Обозначение класса точности СИ по зависимости (4.10) осуществляется указанием численных размеров c и d по $A \cdot 10^n$ через наклонную черту $\frac{c}{d}$. При этом следует помнить, что минимальное значение δ_{\min} соответствует концу шкалы $\delta_{\min}(X = X_K) = \pm c$, а на середине шкалы $\delta\left(X = \frac{X_K}{2}\right) = \pm(c + d)$. Последнее определяет разумный предел измерения (последние 50 % шкалы) физической величины для конкретного СИ.

Маркировка и обозначения классов точности СИ согласно ГОСТ 8.401 – 80 приведены в табл.4.1.

В обоснованных случаях пределы допускаемых относительных основных погрешностей СИ устанавливаются по более сложным формулам, чем (4.9) и (4.10) в виде графика или таблицы.

Пределы допускаемых дополнительных погрешностей определяются для рабочих (нормальных и номинальных) областей внешних влияющих величин (ВВВ) и для расширенных значений ВВВ, которые указываются для типов СИ в нормативных документах.

Для нормальной области значений влияющих факторов дополнительные погрешности средств измерения не должны превышать допускаемых значений основных статических погрешностей устройств для каждого влияющего фактора.

Классы точности СИ

Вид погрешности	Обозначение класса точности		СИ, рекомендуемые к обозначению таким способом
	в НТД	на СИ	
Абсолютная	класс точности N	N	Меры
	класс точности III	III	
Относительная	класс точности 0,5	⊙0,5	Мосты, счетчики, делители, измерительные трансформаторы
Относительная	класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01	Цифровые СИ, магазины емкостей (сопротивлений)
	класс точности C или класс точности II	C II	
Приведенная	класс точности 1,5	1,5	Аналоговые СИ; если X_N – в единицах величины
	класс точности 0,5	∇0,5	

Для расширенной области значений влияющего фактора в соответствии с ГОСТ 8.009 – 72 определяются и нормируются либо функция влияния $\psi(\xi)$ для указанной области изменения влияющего фактора ξ , например, $\psi(\xi) = \pm 0,1\% / \pm 10^\circ C$ при $T = \pm 50^\circ C$, либо наибольшие допускаемые

изменения метрологических характеристик от номинальных данных $\Delta(\xi)$, например, $\Delta(\xi) = \pm 0,5\%$ при $T = \pm 50^\circ\text{C}$, для указанной области изменения влияющего фактора ξ . Причем функция влияния нормируется указанием формулы, числа, таблицы или графика и предела допускаемых отклонений от номинального ее значения $\psi_H(\xi)$. Величина $\Delta(\xi)$ нормируется границами зоны допускаемых значений вокруг номинального значения конкретной метрологической характеристики при нормальных условиях эксплуатации, а границы зоны указываются в единицах метрологической характеристики или в процентах от ее значения, нормированного для нормальных или номинальных условий эксплуатации. Величины $\psi(\xi)$ или $\Delta(\xi)$ нормируется отдельно для каждого влияющего фактора ξ .

Для технических СИ динамические свойства средств измерения характеризуются временем установления показаний t_y , т. е. временем между началом и окончанием переходного процесса в устройстве. Причем на вход устройства воздействуют скачкообразным изменением входной величины, а на выходе фиксируют момент, когда характеристика преобразования войдет в зону допустимых для нее значений неопределенности (гл.4.2). Эта зона для большинства средств измерения определяется их основной статической погрешностью $\pm \Delta Y_H = \pm \Delta$. Для средств автоматики допускается отклонение от номинальной статической характеристики $\Delta = \pm 5\%$. В зависимости от динамических свойств СИ t_y будут иметь различные значения.

Наиболее общим способом определения динамической погрешности является указание частотного диапазона средства измерения, т.е. указание наименьшей и наибольшей частоты изменения измеряемой величины, при которых погрешность устройства начинает превышать допускаемое значение (обычно равное его основной статической погрешности или значению, указанному в ТУ).

Частотный диапазон прибора, состоящего из ряда измерительных преобразователей, определяется тем преобразователем, который имеет

минимальную полосу пропускания частот. Практически такими преобразователями являются гидравлические, пневматические, механические и тепловые. Причем, если в первых инерционность определяется массами перемещаемого вещества или деталей и жесткостью закрепления деталей, то в последних – тепловой инерцией, зависящей в первую очередь от массы датчиков.

В общем случае, как известно [12], динамическая характеристика измерительных устройств может быть представлена в форме дифференциального уравнения, связывающего входную X , выходную Y величины и их производные

$$f_1(Y^n, Y^{n-1}, \dots, Y^1, Y) = f_2(X^m, X^{m-1}, \dots, X^1, X).$$

Для линейных измерительных устройств это уравнение приводится к виду

$$a_0 Y^n + a_1 Y^{n-1} + \dots + a_{n-1} Y^1 + a_n Y = b_0 X^m + b_1 X^{m-1} + \dots + b_{m-1} X^1 + b_m X).$$

Постоянные коэффициенты $a_i, i = \overline{1, n}$ и $b_j, j = \overline{1, m}$ определяются как частные производные функции f_1 и f_2 по соответствующим переменным. Заметим, что к такому же виду можно привести и нелинейные измерительные системы в результате их линеаризации.

Динамическую характеристику ИУ, которые описываются линейными уравнениями, можно представить в операторной форме на основании преобразований Лапласа:

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) L(Y) = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) L(X),$$

где p — комплексный параметр; $L(X)$ и $L(Y)$ — изображение по Лапласу входного и выходного сигналов.

Из этого уравнения определяют передаточную функцию устройства, равную отношению изображений выходного и входного сигналов при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{L(Y)}{L(X)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n}.$$

Если приравнять к нулю знаменатель передаточной функции, получим характеристическое уравнение СИ

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n = 0.$$

По этому уравнению удобно оценивать динамическую устойчивость средства измерения.

Из выражения для $W(p)$, полагая $p=0$, находят чувствительность или коэффициент преобразования СИ:

$$S = K = W(0) = \frac{b_m}{a_n}.$$

Общая передаточная функция $W(p)$ прибора зависит от передаточных функций отдельных преобразователей (динамических звеньев составляющих СИ) и от способа их соединения (последовательного, параллельного, встречно-параллельного или смешанного).

Динамические свойства СИ или преобразователя наряду с передаточной функцией характеризуются амплитудно-частотной и фазочастотной характеристиками. При замене оператора p для $W(p)$ мнимым числом $j\omega$ и передаточная функция приводится к виду

$$W(j\omega) = Q(\omega) + jN(\omega).$$

Произведение модуля этой комплексной функции на амплитуду входного сигнала представляет собой аналитическое выражение для амплитудно-частотной характеристики.

Аргумент комплексной функции

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{N(\omega)}{Q(\omega)}$$

определяет фазочастотную характеристику.

Существуют и другие правила определения и нормирования динамических характеристик преобразователей, с которыми можно ознакомиться в работе [12].

Раздел 2. Основы законодательной метрологии

Глава 5. Общие сведения

5.1. Задачи законодательной метрологии

Для обеспечения единства и качества измерений, а также в соответствии с международными нормами (результаты измерения должны быть получены путем сравнения размера измеряемой величины с размером единицы измерения, воспроизводимой исходным эталоном) возникает необходимость установления в *законодательном* порядке комплекса правовых и нормативных актов и регламентов.

Поэтому предметом *законодательной метрологии* (ЗМ) является установление законодательных и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов, методик и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимой точности измерений в интересах общества [3].

Вся метрологическая деятельности в России закреплена на государственном уровне статьей 71 Конституции РФ и соответствующими законами (см. рис. 5.1).

Задачами ЗМ являются:

- установление правовых основ обеспечения единства измерений в РФ;
- регулирование отношений Государственных органов управления с юридическими и физическими лицами по вопросам изготовления, выпуска, эксплуатации, ремонта, продажи и импорта СИ;
- защита прав и законных интересов граждан, в соответствии с установленным правопорядком и экономикой РФ от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений;
- содействие прогрессу на основе создания, обновления и применения государственных эталонов основных и производственных единиц;

- гармонизация Российской метрологической системы с мировой практикой.



Рис.5.1. Нормативно-законодательная база обеспечения единства измерений

Вся метрологическая деятельность в Российской Федерации основывается на конституционной норме, которая устанавливает, что в федеральном ведении находятся стандарты, эталоны, метрическая система и исчисление времени, она закрепляет централизованное руководство

основными вопросами законодательной метрологии, такими, как единицы ФВ, эталоны и связанные с ними другие метрологические основы (рис.5.2 и рис.5.3). В последующем приняты законы «Об обеспечении единства измерений» и «О техническом регулировании», детализирующие основы метрологической деятельности.

Эта законотворческая деятельность особенно важна в настоящее время, поскольку современная метрология характеризуется новыми научными идеями, идет процесс взаимного проникновения репрезентативной теории измерений (шкал), информационной теории измерений, теорий нечеткой логики, нейронных сетей, генетических алгоритмов, теории синергетики и т.п. «Интеллектуальные» измерения и средства находят все большие сферы применения в медицине, экологии, а также в сложных наукоемких технологиях.

5.2. Основы метрологического обеспечения систем контроля, измерения и управления

Под метрологическим обеспечением (МО) понимается установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Основной тенденцией в развитии МО является переход от существовавшей ранее сравнительно узкой задачи обеспечения единства и требуемой точности измерений к принципиально новой задаче обеспечения качества измерений [13]. Качество измерений — понятие более широкое, чем точность измерений. Оно характеризует совокупность свойств СИ, обеспечивающих получение в установленный срок результатов измерений с требуемыми точностью (размером допускаемых погрешностей), достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью.

Федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по нормативно-правовому регулированию

- разрабатывает государственную политику и осуществляет нормативно-правовое регулирование в области обеспечения единства измерений;
- организует разработку и реализацию программ развития средств и методов обеспечения единства измерений;
- координирует проведение работ по обеспечению единства измерений;
- организует и осуществляет взаимодействие с органами государственной власти, иностранных государств и международными (региональными) организациями по вопросам обеспечения единства измерений;
- участвует в деятельности международных (региональных) организаций по вопросам обеспечения единства измерений, является официальным представителем Российской Федерации в международных (региональных) организациях.

Федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по оказанию государственных услуг в сфере метрологии, а так же подведомственные ему организации

- ведение государственных реестров в области обеспечения единства измерений и предоставление сведений из этих реестров;
- обеспечение проведения международных сличений государственных эталонов единиц величин;
- организация и обеспечение проведения обязательной метрологической экспертизы;
- обеспечение создания и ведения Федерального информационного фонда и единой информационной системы в области обеспечения единства измерений и предоставление информации;
- выдача заключений об отнесении устройств к средствам измерения;
- руководство подведомственными организациями.

Совет при Федеральном органе исполнительной власти, осуществляющий функции по нормативно-правовому регулированию

Создается для рассмотрения организационных, научно-методических и практических вопросов в области обеспечения единства измерений

Федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по государственному метрологическому контролю и надзору

- Осуществляет:
- государственный метрологический надзор;
 - утверждение типа средств измерений;
 - аккредитацию метрологических служб на право поверок;
 - аттестацию поверителей

Иные федеральные органы исполнительной власти, осуществляющие функции по государственному контролю (надзору) в установленной сфере деятельности

Рис.5.2. Структура организации деятельности по обеспечению единства измерений в соответствии с Законом «Об обеспечении единства измерений»

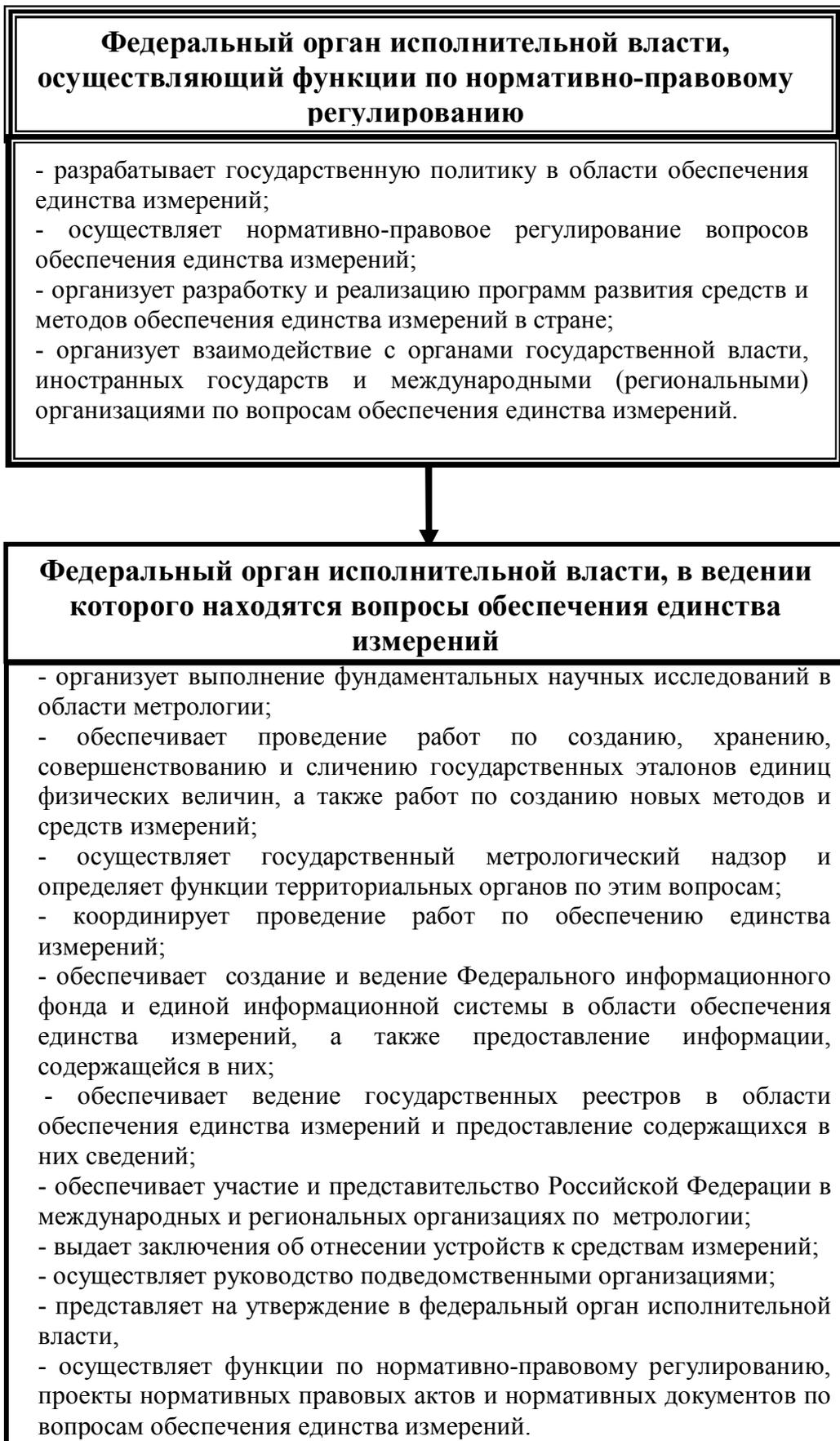


Рис.5.3. Предложения по внесению изменений в структуру организации деятельности по обеспечению единства измерений

Понятие "метрологическое обеспечение" применяется, как правило, по отношению к измерениям (испытанию, контролю, диагностике) в целом. В то же время допускают использование термина "метрологическое обеспечение технологического процесса (производства, организации)", подразумевая при этом МО измерений (испытаний или контроля) в данном процессе, производстве, организации.

Объектом МО являются все стадии жизненного цикла изделия (продукции) или услуги. Под жизненным циклом понимается совокупность последовательных взаимосвязанных процессов создания и изменения состояния продукции от формулирования исходных требований к ней до окончания эксплуатации или потребления. Так, на стадии разработки продукции для достижения высокого качества изделия производится выбор контролируемых параметров, норм точности, допусков, средств измерения, контроля и испытания. Также осуществляется метрологическая экспертиза конструкторской и технологической документации.

При разработке МО необходимо использовать системный подход, суть которого состоит в рассмотрении указанного обеспечения как совокупности взаимосвязанных процессов, объединенных одной целью – достижением требуемого качества измерений. Такими процессами являются:

- установление рациональной номенклатуры измеряемых параметров и оптимальных норм точности измерений при контроле качества продукции и управлении процессами;
- технико - экономическое обоснование и выбор СИ, испытаний и контроля и установление их рациональной номенклатуры;
- стандартизация, унификация и агрегатирование используемой контрольно-измерительной техники;
- разработка, внедрение и аттестация современных методик выполнения измерения, испытаний и контроля (МВИ);

- поверка, метрологическая аттестация и калибровка контрольно-измерительного и испытательного оборудования (КИО), применяемого на предприятии;
- контроль за производством, состоянием, применением и ремонтом КИО, а также за соблюдением метрологических правил и норм на предприятии;
- участие в разработке и внедрении стандартов предприятия;
- внедрение международных, государственных и отраслевых стандартов, а также иных нормативных документов Государственной метрологической службы;
- проведение метрологической экспертизы проектов нормативной, конструкторской и технологической документации;
- проведение анализа состояния измерений, разработка на его основе и осуществление мероприятий по совершенствованию МО;
- подготовка работников соответствующих служб и подразделений предприятия к выполнению контрольно-измерительных операций.

Метрологическое обеспечение имеет четыре основы: научную, организационную, нормативную и техническую (рис.5.4). Отдельные аспекты МО рассмотрены в рекомендации МИ 2500—98 по метрологическому обеспечению малых предприятий. Разработка и проведение мероприятий МО возложены на метрологические службы (МС). Метрологическая служба □ служба, создаваемая в соответствии с законодательством для выполнения работ по обеспечению единства измерений и осуществления метрологического контроля и надзора.

Как известно, для поддержания *единства измерений физических величин* необходимо осуществлять ряд измерительных процедур, которые укрупненно приведены ниже:

1. Создание модели измеряемой величины.
2. Селекция (выявление информативной измеряемой величины в объекте наблюдения).

3. Первичное преобразование измеряемой величины в измерительный сигнал.
4. Последовательное преобразование измерительных сигналов, включая алгоритмы их обработки.
5. Сравнение измеряемой величины с мерой или шкалой.
6. Отображение результатов измерений и их погрешностей.

Для нахождения *модели измеряемой величины* необходимо:

1. Выполнить анализ цели измерения, априорных данных об условиях измерения, исследуемой величине, объекте, требуемой точности.
2. Произвести уточнение модели объекта исследования и физической величины.
3. Определить изменения величины в рамках полученной модели исследуемого объекта.
4. Формализовать измерительную задачу на основе принятой модели физической величины.
5. Выбрать конкретные величины, на основе измерения которых будет находиться искомое значение измеряемой величины (косвенные и другие виды измерений).
6. Установить зависимости между измеряемой и непосредственно наблюдаемыми на опыте величинами.

Взаимодействие исследуемого объекта и средства измерений предполагает поиск, обнаружение и восприятие (рецепцию) измеряемой физической (особенно технологической) величины, а также при необходимости - некоторые подготовительные операции типа пробоотбора и пробоподготовки, воздействия на объект для получения отклика, определения ориентации и локализации датчиков в пространстве и времени.



Рис. 5.4. Основы метрологического обеспечения

Различение или селекция сигнала измерительной информации подразумевают выделение именно того свойства объекта, которому соответствует измеряемая физическая величина, включая выделение полезного сигнала на фоне шумов с использованием методов и средств борьбы с помехами.

Преобразование включает в себя изменение физической природы носителя информации или его формы (усиление, ослабление, модуляция, манипуляция, дискретизация и квантование, аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразования, кодирование и декодирование и др.), а также передачу сигналов измерительной информации по каналам связи и при необходимости - запись, хранение и воспроизведение их в устройствах памяти.

Сравнение с мерой может осуществляться как непосредственно, так и опосредованно – с помощью шкалы или через какой-либо физический или технический механизм. (Обобщением этой операции является информационное сравнение с образом).

Отображение результатов измерений предполагает обработку данных по выбранному алгоритму, оценку погрешностей измерения, индикацию результатов на цифровом табло, стрелочном приборе, самописце, распечатку или графическое представление, использование их в системах автоматического управления, семантический анализ (оценку) полученных результатов, идентификацию, структурирование и передачу в базы данных и знаний систем искусственного интеллекта.

Таким образом, МО как процесс обеспечения качества измерений связывает научный и организационный подходы при создании любых, в том числе, инновационных технологий.

Глава 6. Метрологические службы и организации

6.1. Государственная метрологическая служба

Государственная метрологическая служба (ГМС) несет ответственность за метрологическое обеспечение измерений в стране на межотраслевом уровне и осуществляет государственный метрологический контроль и надзор. В состав ГМС входят[9]:

- государственные научные метрологические центры (ГНМЦ), метрологические научно-исследовательские институты, несущие в соответствии с законодательством ответственность за создание, хранение и применение государственных эталонов и разработку нормативных документов по обеспечению единства измерений в закреплённом виде измерений;
- органы ГМС на территории республик в составе России, автономной области, автономных округов, краёв, областей, городов Москвы и Санкт - Петербурга. Основная деятельность органов ГМС направлена на обеспечение единства измерений в стране. Она включает создание государственных и вторичных эталонов, разработку систем передачи размеров единиц ФВ рабочим СИ, государственный надзор за производством, состоянием, применением, ремонтом СИ, метрологическую экспертизу документации и важнейших видов продукции, методическое руководство МС юридических лиц. Руководство ГМС осуществляется Госстандартом.

Государственные научные метрологические центры образуются из числа находящихся в ведении Госстандарта предприятий и организаций или их структурных подразделений, выполняющих работы по созданию, совершенствованию, хранению и применению государственных эталонов единиц величин, а также ведущих разработку нормативных документов по обеспечению единства измерений и имеющих высококвалифицированные научные кадры.

Присвоение конкретному предприятию, организации статуса ГНМЦ не изменяет формы собственности и организационно - правовой формы, а означает отнесение их к категории объектов, предполагающей особые формы государственной поддержки. Основные функции ГНМЦ:

- создание, совершенствование, хранение и применение государственных эталонов единиц величин;
- выполнение фундаментальных и прикладных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области метрологии, в том числе по созданию уникальных опытно-экспериментальных установок, шкал и исходных мер для обеспечения единства измерений;
- передача размеров единиц величин от государственных эталонов исходным;
- проведение государственных испытаний средств измерений;
- разработка оборудования, необходимого для оснащения органов ГМС;
- разработка и совершенствование научных, нормативных, организационных и экономических основ деятельности по обеспечению единства измерений в соответствии со специализацией;
- взаимодействие с МС федеральных органов исполнительной власти, предприятий и организаций, являющихся юридическими лицами;
- информационное обеспечение предприятий и организаций по вопросам единства измерений;
- проведение работ, связанных с деятельностью Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), Государственной службы стандартных образцов (ГССО) и Государственной службы стандартных справочных данных (ГСССД);
- проведение экспертизы разделов МО федеральных и иных программ;
- проведение метрологической экспертизы и измерений по поручению органов суда, прокуратуры, арбитражного суда и федеральных органов исполнительной власти;

- подготовка и переподготовка высококвалифицированных кадров;
- участие в сличении государственных эталонов с национальными эталонами других стран, разработке международных норм и правил.

Деятельность ГНМЦ регламентируется постановлением Правительства Российской Федерации от 12.02.94 № 100.

Метрологическая служба создается для научно-технического и организационно-методического руководства работами по МО и может включать:

- структурные подразделения главного метролога в центральном аппарате государственного органа;
- головные и базовые организации МС в отраслях и подотраслях, назначаемые органом управления;
- МС предприятий, объединений, организаций и учреждений.

Метрологическая служба юридических лиц — самостоятельные структурные подразделения, в состав которых могут входить калибровочные и поверочные лаборатории, а также подразделения по ремонту СИ. Эти МС должны быть аккредитованы органами ГМС, в нормативных документах которых регламентирован порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право аттестации методик выполнения измерений и проведения метрологической экспертизы документов.

При аккредитации поверке подлежит наличие условий, обеспечивающих техническую компетентность МС в реализации возложенных на нее функций в области обеспечения единства измерений. Условия аккредитации предполагают наличие:

- оборудования, необходимого для проведения работы в области аккредитации;
- нормативных документов ГСИ и других нормативных документов в области аккредитации;
- достаточного по количеству и квалификации (в области аккредитации) персонала;

- помещений для проведения метрологических работ.

Аккредитация проводится на срок, не превышающий пяти лет.

Регистрацию аккредитованных МС юридических лиц осуществляет ГП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

6.2. Международные метрологические организации

В 1875 г. семнадцать государств, в том числе и Россия, подписали Метрическую конвенцию, к которой в настоящее время присоединились 48 стран. Конвенция устанавливает международное сотрудничество стран, ее подписавших. Для этого было создано Международное бюро мер и весов (МБМВ) (Bureau International des Poids et Mesures), находящееся в г. Севре близ Парижа. Задача МБМВ состоит в том, чтобы гарантировать международную однородность измерений и их соответствие Международной системе единиц СИ. С этой целью создана единая для всех государств система передачи размеров единиц ФВ системы СИ. Эта задача многогранна и решается путем либо прямого распространения эталонов (как в случае массы), либо координацией через международные сравнения национальных эталонов (как в длине, электричестве, радиометрии). Бюро выполняет исследования, связанные с измерениями, организует международные сравнения национальных эталонов и выполняет калибровки для государств-членов. В МБМВ хранятся международные прототипы ряда мер и эталоны единиц некоторых физических величин.

Деятельность МБМВ финансируется совместно государствами-членами Метрической конвенции.

В соответствии с конвенцией для осуществления руководства деятельностью МБМВ был учрежден Международный комитет мер и весов (МКМВ) (Comitee International des Poids et Mesures), который подотчетен Генеральной конференции мер и весов (ГКМВ) (Conference Generale des Poids et Mesures). Последняя выбирает членов МКМВ на периодических (раз

в 4 года) собраниях представителей правительств государств-членов. Сейчас при МКМВ действуют семь консультативных комитетов: по определению единиц длины, массы, времени, электрических величин, единиц фотометрии и радиометрии, по единицам ионизирующих излучений и единицам для измерения химических величин.

Отметим, что МБМВ и МКМВ работают в тесном сотрудничестве с международными метрологическими организациями. Особенно близкие связи установлены с Международной организацией законодательной метрологии (МОЗМ) и Международной организацией по стандартизации (ИСО). Осуществляется также взаимодействие с Международной электротехнической комиссией (МЭК) и рядом других международных организаций. Члены МБМВ участвуют в работе международных организаций через членство различных комитетов этих организаций. Участвуя в многочисленных международных встречах и конференциях, члены МБМВ играют важную роль в координации международных измерений.

МБМВ совместно с международными организациями разработала и опубликовала "Руководство для выражения неопределенности измерений" [13] и "Международный словарь основных и общих метрологических терминов". В МБМВ Россия представлена ГП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и ГП ВНИФТРИ.

Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ) (International Organization of Legal Metrology) была создана в 1955 г. для обеспечения всеобщей гармонизации законодательных процедур метрологии и установления взаимного доверия к результатам измерений, проводимых в странах – членах Метрической конвенции. Это межправительственная организация, в которую входят действительные члены – страны, активно участвующие в ее работе, и члены-корреспонденты – страны, являющиеся наблюдателями. В настоящее время МОЗМ объединяет более 80 государств.

Высшим органом МОЗМ является Международная конференция законодательной метрологии, которая собирается раз в 4 года. Решения

МОЗМ носят рекомендательный характер, и их исполнение зависит от воли конкретного государства. Она издает международные документы (МД), предназначенные для его рабочих органов, и рекомендации (МР), которые адресованы странам-членам. В Российской Федерации указанные документы хранятся в ВНИИМС.

Отметим, что МОЗМ активно участвует в работе таких организаций, как ИСО, МБМВ и других. Россию в МОЗМ представляет Госстандарт.

Международная организация по стандартизации (ИСО) (International Organization of Standardization) была создана в 1946 г. двадцатью пятью национальными организациями по стандартизации, в том числе и СССР. Россия стала членом ИСО как правопреемник последнего. Членами ИСО являются национальные организации по стандартизации стран мира. В начале 2000 г. членами ИСО были 135 стран.

Сфера деятельности ИСО распространяется на все области, кроме электротехники и электроники, стандартизацией которых занимается МЭК. В некоторых областях эти две организации действуют совместно. Главной задачей ИСО является содействие развитию:

- стандартизации, метрологии и сертификации с целью обеспечения международного обмена товарами и услугами;
- сотрудничества в интеллектуальной, научно-технической и экономической областях.

Стандарты ИСО широко используются в мире, их число в настоящее время превышает 14 тыс., причем ежегодно принимаются или пересматриваются около тысячи стандартов. Они не являются обязательными для применения странами – членами ИСО. Решение об их применении связано со степенью участия конкретной страны в международном разделении труда и состоянием ее внешней торговли. В России в настоящее время идет активный процесс внедрения стандартов ИСО в национальную систему стандартизации.

Международная электротехническая комиссия (МЭК) (International Electrotechnical Commission) создана в 1906 г. После Второй мировой войны МЭК стала автономной организацией в составе ИСО. Основная цель создания МЭК аналогична цели ИСО – содействие международному сотрудничеству по стандартизации, метрологии и сертификации в области электротехники и радиотехники путем разработки международных стандартов.

Большинство стран – членов МЭК представлены своими национальными органами по стандартизации. Активное сотрудничество МЭК с ИСО выражается в публикации руководств и директив ИСО/МЭК по актуальным вопросам стандартизации, сертификации и аккредитации испытательных лабораторий. Непосредственно МЭК принято более 2 тыс. международных стандартов, которые отличаются от стандартов ИСО большей конкретизацией требований к объектам.

Отдельными вопросами метрологии занимаются такие международные организации, такие как Международная конференция по измерительной технике и приборостроению (ИМГКО), Международный консультативный комитет по радиосвязи (МККР), Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии (МККТТ), Международная организация гражданской авиации, Международный телекоммуникационный союз (ITU), Международный астрономический союз (IAU), Международный союз геодезии и географии и др.

В рамках СНГ вопросы стандартизации, сертификации и метрологии решаются в соответствии с межправительственным документом «Соглашение о проведении согласованной политики в области стандартизации, метрологии и сертификации» (1992). На его основе создан Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ, где представлены все национальные организации по стандартизации, метрологии и сертификации этих стран. Он признан ИСО региональной организацией по стандартизации стран СНГ.

Раздел 3. Основы практической метрологии

Глава 7. Прикладное обеспечение единства и качества измерений

7.1. Государственный метрологический контроль и надзор

Как известно [8], практическая (прикладная) метрология – это раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

Практическая реализация правил и норм теоретической и законодательной метрологии, в основном, осуществляется через государственные метрологический контроль, надзор, испытания СИ и метрологическую экспертизу.

Государственный метрологический контроль – это деятельность, осуществляемая государственной метрологической службой по утверждению типа СИ, поверке СИ (включая рабочие эталоны), по лицензированию* деятельности юридических и физических лиц по изготовлению, ремонту, продаже и прокату СИ [3].

Государственный метрологический надзор – это деятельность, осуществляемая органами государственной метрологической службы по надзору за выпуском, состоянием, применением СИ (включая рабочие талоны), за аттестованными методиками измерений, соблюдением метрологических правил и норм, за количеством товаров при продаже, а также за количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при их расфасовке и продаже [3].

* Лицензия на изготовление (ремонт, продажу, прокат) СИ представляет собой документ, удостоверяющий право заниматься указанными видами деятельности и выдаваемый органом государственной метрологической службы.

Государственный контроль и надзор распространяется на измерения, выполняемые при

- защите жизни и здоровья человека;
- охране окружающей среды;
- обеспечении безопасности;
- осуществлении торговых операций;
- взаимных расчетах между покупателем и продавцом.

В сферах действия государственного контроля и надзора СИ подвергаются обязательным испытаниям с последующим утверждением их типа. Порядок проведения испытаний и утверждения типа СИ включает:

- испытания СИ с целью утверждения их типа. **Утверждение типа СИ** — правовой акт ГМС, заключающийся в признании типа СИ пригодным в стране для серийного выпуска;

- принятие решения об утверждении типа, его государственную регистрацию и выдачу соответствующего сертификата;

- испытания СИ на соответствие утвержденному типу. Соответствие утвержденному типу СИ — правовой акт ГМС, заключающийся в признании соответствия выпускаемых серийно СИ ранее утвержденному типу;

- признание утвержденного типа или результатов испытаний СИ, проведенных компетентными органами зарубежных стран;

- информационное обслуживание потребителей измерительной техники.

Испытания СИ с целью утверждения их типа проводят по утвержденной Государственным центром испытаний программе, которая должна содержать следующие разделы:

- рассмотрение технической документации;
- экспериментальное исследование СИ;
- оформление результатов испытаний.

Испытания на соответствие СИ утвержденному типу проводят:

- при наличии информации от потребителей об ухудшении качества выпускаемых или импортируемых СИ;

• при внесении в их конструкцию или технологию изменений, влияющих на их нормированные МХ;

• при истечении срока действия сертификата об утверждении типа.

Испытания СИ проводят научные метрологические центры, аккредитованные Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование) в качестве государственных центров испытаний СИ. В качестве центров испытаний СИ могут быть аккредитованы и другие специализированные организации. Термины «государственные приемочные испытания» и «государственные контрольные испытания» упразднены.

По результатам испытаний составляют акт, который направляют во Всероссийском НИИ метрологии и стандартизации им. Д.И.Менделеева.

7.2. Основные метрологические операции обеспечения качества измерений

По действующему законодательству [8] все СИ, подлежащие государственному контролю и надзору, должны быть подвергнуты проверке при выпуске из производства, после ремонта при ввозе по импорту и в период эксплуатации и хранения.

Проверка СИ – это установление органом ГСМ (или другим официально уполномоченным органом или организацией) пригодности СИ к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям.

В [8] под проверкой СИ понимается совокупность операций, выполняемых с целью подтверждения соответствия СИ установленным техническим требованиям.

Перечень СИ, подлежащих проверке, утверждается Правительством РФ. К таким СИ предъявляется ряд жестких требований:

–недопустимость применения для измерений, подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору, СИ не поверенных или с просроченным сроком очередной поверки;

–проведение поверки исключительно органами государственного метрологического контроля и надзора или организациями, уполномоченными этими органами;

–строгое соблюдение требований методики поверки, утвержденной на государственном уровне, и установленных межповерочных интервалов.

Все остальные СИ подлежат калибровке.

Результатом поверки является:

- подтверждение пригодности СИ к применению. В этом случае на него и (или) техническую документацию наносится отпечаток поверительного клейма и (или) выдается Свидетельство о поверке. *Поверительное клеймо* — знак установленной формы, наносимый на СИ, признанные в результате их поверки годными к применению;

- признание СИ непригодным к использованию. В этом случае отпечаток поверительного клейма и (или) Свидетельство о поверке аннулируются и выписывается Свидетельство о непригодности.

Средства измерения подвергаются первичной, периодической, внеочередной, инспекционной и экспертной поверкам.

Первичная поверка проводится при выпуске СИ из производства или после ремонта, а также при ввозе СИ из-за границы партиями. Такой поверке подвергается, как правило, каждый экземпляр СИ.

Периодическая поверка выполняется через установленные интервалы времени (межповерочные интервалы). Ей подвергаются СИ, находящиеся в эксплуатации или на хранении. Конкретные перечни СИ, подлежащих поверке, составляют их владельцы — юридические и физические лица. Органы ГМС в процессе надзора за соблюдением метрологических норм и правил проверяют правильность составления этих перечней.

Периодическую поверку должен проходить каждый экземпляр СИ.

Исключения могут составлять СИ, находящиеся на длительном хранении. Результаты такой поверки действительны в течение межповерочного интервала.

Внеочередная поверка СИ проводится до наступления срока его периодической поверки в случаях:

- повреждения знака поверительного клейма или утрате Свидетельства о поверке;
- ввода в эксплуатацию СИ после длительного хранения (более одного межповерочного интервала);
- проведения повторной настройки, известном или предполагаемом ударном воздействии на СИ или при неудовлетворительной его работе;
- отправки потребителю СИ, не реализованных по истечении срока, равного половине межповерочного интервала;
- применения СИ в качестве комплектующих по истечении срока, равного половине межповерочного интервала.

Инспекционная поверка проводится органами метрологической службы (МС) при осуществлении государственного надзора или ведомственного контроля за состоянием и применением СИ. Ее допускается проводить не в полном объеме, предусмотренном методикой поверки. Результаты инспекционной поверки отражаются в акте.

Основной метрологической характеристикой СИ, определяемой при поверке, является погрешность. Она находится на основании сравнения показаний поверяемого СИ с более точным СИ (контрольным, образцовым, эталонным).

Важным при поверке является выбор оптимального соотношения между допускаемыми погрешностями эталонного и поверяемого СИ. Обычно это соотношение принимается равным 1:3 (исходя из критерия ничтожно малой погрешности), когда при поверке вводят поправки на показания образцовых СИ. Если поправки не вводят, то эталонные СИ выбираются из соотношения 1:5. Соотношение допускаемых погрешностей поверяемых и эталонных СИ

устанавливается с учетом принятого метода поверки, характера погрешностей, допускаемых значений ошибок первого и второго рода и иногда может значительно отличаться от указанных ранее цифр.

Результатом поверки является:

- подтверждение пригодности СИ к применению. В этом случае на него и (или) техническую документацию наносится оттиск поверительного клейма и (или) выдается Свидетельство о поверке. Поверительное клеймо – знак установленной формы, наносимый на СИ, признанные в результате их поверки годными к применению;

- признание СИ непригодным к использованию. В этом случае оттиск поверительного клейма и (или) Свидетельство о поверке аннулируются и выписывается Свидетельство о непригодности. Средства измерения подвергаются первичной, периодической, внеочередной, инспекционной и экспертной поверкам.

Важным при поверке является выбор оптимального соотношения между допускаемыми погрешностями эталонного и поверяемого СИ. Обычно это соотношение принимается равным 1:3 (исходя из критерия ничтожно малой погрешности), когда при поверке вводят поправки на показания образцовых СИ. Если поправки не вводят, то эталонные СИ выбираются из соотношения 1:5. Соотношение допускаемых погрешностей поверяемых и эталонных СИ устанавливается с учетом принятого метода поверки, характера погрешностей, допускаемых значений ошибок первого и второго рода и иногда может значительно отличаться от указанных ранее цифр.

По решению Ростехрегулирования право поверки СИ может быть предоставлено аккредитованным метрологическим службам (МС) юридических лиц, деятельность которых осуществляется в соответствии с действующим законодательством и нормативными документами по обеспечению единства измерений.

Ростехрегулирования осуществляет периодический инспекционный контроль за деятельностью аккредитованной МС.

Поверка СИ осуществляется физическим лицом, аттестованным в качестве поверителя органом Государственной метрологической службы (ГМС) в соответствии с ПР 50.2.012—94. Поверитель (физическое лицо) — сотрудник органа ГМС или юридического лица, аккредитованного на право поверки, непосредственно производящее поверку СИ и прошедшее аттестацию в установленном порядке.

Проводятся два вида аттестации поверителя: первичная и периодическая (не реже одного раза в пять лет), к которым допускаются лица, имеющие специальную подготовку и практический стаж работы в поверочных подразделениях. Аттестация поверителя проводится специально создаваемой комиссией из числа высококвалифицированных специалистов-метрологов.

Аккредитация МС предусматривает следующие этапы:

- экспертиза документов, представленных МС;
- аттестация МС комиссией из представителей ГНМЦ и ГМС;
- принятие решения об аккредитации по результатам экспертизы;
- оформление, регистрация и выдача Бюро по технической регламентации и метрологии аттестата аккредитации на срок до пяти лет.

Аккредитуемая МС должна иметь:

- квалифицированный и опытный персонал, аттестованный в установленном порядке в качестве поверителей;
- помещения и окружающую среду, удовлетворяющие требованиям нормативных документов;
- поверенные эталоны и иное вспомогательное оборудование, необходимое для проведения поверки определенной областью аккредитации;
- документированные методики и процедуры поверки, обработки и использования измерительной информации, а также актуализации нормативных документов;
- систему менеджмента качества проведения поверочных работ;
- документированные правила приемки, хранения и возврата СИ, поступающих на поверку;

- систему регистрации, использования и хранения результатов поверки.

Детальные требования по перечисленным выше этапам описаны в МИ 2284-94.

Аккредитованная МС имеет право:

- проводить поверку СИ в рамках, определенных аттестатом аккредитации, выдавать Свидетельство о поверке, ставить клеймо на поверенные СИ или гасить поверительные клейма;
- разрабатывать предложения по корректировке межповерочных интервалов;
- участвовать в разработке и корректировке нормативной документации, регламентирующей вопросы аккредитации МС.

Бюро по технической регламентации и метрологии осуществляет периодический инспекционный контроль за деятельностью аккредитованной МС.

Таким образом, поверка как метрологическая процедура состоит из двух аспектов: технического и директивного. Иначе технически поверка осуществляется экспериментально в соответствующих МС, а принятие решения о соответствии СИ установленным нормам (верификация) осуществляется государственными органами верификации на основании лабораторных исследований.

В сферах деятельности, где государственный метрологический надзор и контроль не являются обязательными, для обеспечения метрологической исправности СИ применяется калибровка. **Калибровка** (калибровочные работы) — совокупность операций, выполняемых с целью определения действительных значений метрологических характеристик СИ [3].

Однако в научных метрологических службах используется другое понятие калибровки. Калибровкой СИ называют совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного СИ, и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона или образцового СИ. Иначе в процессе

калибровки СИ приписывают калибровочную зависимость – зависимость между выходным сигналом и входной измеряемой величиной. Такую зависимость также называют градуировочной.

В [8] для обеспечения единства измерений у СИ, не подлежащих государственному надзору и контролю, используют не поверку, а калибровку.

Для проведения калибровочных работ создана Российская система калибровки (РСК) — совокупность субъектов деятельности и калибровочных работ, направленных на обеспечение единства измерений в сферах, не подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору и действующих на основе установленных требований к организации и проведению калибровочных работ.

Основные направления деятельности РСК:

- регистрация органов, осуществляющих аккредитацию МС юридических лиц на право проведения калибровочных работ;
- аккредитация МС юридических лиц на право проведения калибровочных работ:
 - калибровка СИ;
 - установление основных принципов и правил РСК, организационное, методическое и информационное обеспечение его деятельности;
 - инспекционный контроль за соблюдением аккредитованных МС требований к проведению калибровочных работ.

РСК имеет свой знак, наносимый на калиброванное СИ.

Следует подчеркнуть, что для подтверждения единства измерений используется также деятельность метрологических и других служб, связанная с метрологическим обеспечением измерений. Это деятельность, направленная на создание в стране необходимых эталонов, поверочных схем, технических СИ, МВИ и разработку и установление метрологических правил и норм и т.п., выполнение которых обеспечивает качество измерений на объекте, процессе, предприятии и отрасли.

Глава 8. Обеспечение точности результатов измерений

8.1. Определение прецизионности и правильности результатов измерений

В этой главе излагается получающая все большее распространение в стране и мире методология обеспечения точности измерений, регламентированная международными стандартами ИСО серии 5725 (в России они внедрены государственными стандартами ГОСТ Р ИСО 5725-1-ГОСТ Р ИСО 5725-6) [1].

В соответствии с классическим подходом, изложенным в гл.3.1., погрешность измерений определяется степенью близости результата измерения к истинному значению измеряемой величины, причем за действительное значение величины принимается ее значение, определенное с помощью более точных СИ (в пределе – эталонов). Но этот подход неприменим ко многим измерительным задачам, для которых точные СИ либо отсутствуют в настоящее время, либо их в принципе не может быть. К таким задачам относятся изменения многих элементов химического состава веществ, материалов и объектов окружающей природной среды, измерения показателей качества продукции, измерения в биологии, медицине и многие другие. В этом случае в качестве действительного значения величины в международной и отечественной практике обычно условно принимают ее наиболее вероятное значение, определенное по итогам авторитетных научных или инженерных исследований. Это значение называется принятым опорным значением величины. Оно определяется следующим образом: принятое опорное значение – значение, согласованное для сравнения и полученное как:

а) теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах;

б) приписанное или аттестованное значение, базирующееся на экспериментальных работах какой-либо рациональной или международной организации;

в) согласованное или аттестованное значение, базирующееся на совместных или экспериментальных работах под руководством какой-либо научной или инженерной группы;

г) математическое ожидание, т.е. среднее значение заданной совокупности результатов измерений (лишь в том случае, когда а), б) и в) недоступны).

Это определение соответствует методологии стандартов ИСО 5725.

Вследствие этого определения несколько изменяется определение точности измерений, данное в разд.3.1. Под точностью понимается степень близости результата измерений к истинному или, в его отсутствие, принятому опорному значению. В свою очередь, точность измерений обусловлена двумя различными свойствами измерений: правильностью и прецизионностью.

Правильность – степень близости среднего значения, полученного на основании большой серии результатов измерений, к принятому опорному значению. Она характеризуется систематической погрешностью, которая определяется как разность между математическим ожиданием результатов измерений и истинным или, в его отсутствие, принятым опорным значением. Прецизионность - степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях. Из этого определения следует, что прецизионность не имеет отношения к истинному или опорному значению измеряемой величины, она зависит только от случайных погрешностей измерения.

В основу рассматриваемой методологии оценки точности измерений положена следующая статическая модель. В группе измерительных или испытательных лабораторий проводятся измерения какой-либо величины одним и тем же стандартизованным методом (например, по

стандартизированной методике выполнения измерений). Результат каждого измерения X_i (где $i=1,2,\dots,n$ – порядковый номер лаборатории) представляет собой сумму:

$$X_i = M + \Delta_{Ci} + \overset{0}{\Delta}_i = X_0 + \bar{\Delta} + \Delta_{Ci} + \overset{0}{\Delta}_i, \quad (8.1)$$

где $M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = X_0 + \bar{\Delta}$ – общее среднее значение результатов всех измерений, которое является суммой истинного или принятого опорного значения измеряемой величины X_0 и систематической погрешности $\bar{\Delta} = \Delta_c^M$, вычисленной по совокупности всех измерений этой величины;

Δ_{Ci} – систематическая погрешность измерения в i -й лаборатории вследствие систематических погрешностей СИ, отличия условий измерений от нормальных условий и других факторов, зависящих от технического состояния оборудования лаборатории и качества работы ее персонала;

$\overset{0}{\Delta}_i$ – случайная составляющая погрешности измерений в i -й лаборатории.

Сумма систематических погрешностей $\Delta_{Ci}^{\Pi} = \Delta_c^M + \Delta_{Ci}$ является систематической погрешностью измерений в i -й лаборатории. Поэтому она называется систематической погрешностью лаборатории. В соответствии с общим определением систематической погрешности систематическая погрешность лаборатории (при реализации конкретного метода) – разность между математическим ожиданием результатов измерений и отдельной лаборатории и истинным или, в его отсутствие, принятым опорным значением данной величины.

Систематическая погрешность $\Delta_c^M = \bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i$ одна и та же для всех лабораторий. Она обусловлена общими для всех недостатками выбранного метода измерений. Поэтому она называется систематической погрешностью метода измерений. По определению, систематическая погрешность метода

измерений - разность между математическим ожиданием результатов измерений, полученных во всех лабораториях, применяющих данный метод, и истинным или, в его отсутствие, принятым опорным значением данной величины. В отличие от нее значение систематической погрешности Δ_{Ci} зависит от выбора лаборатории. Поэтому она называется лабораторной составляющей систематической погрешности измерений. По определению, лабораторная составляющая систематической погрешности – разность между систематической погрешностью лаборатории при реализации конкретного метода измерений и систематической погрешностью метода измерений.

Разброс погрешностей оценивают дисперсиями. Дисперсия σ_i^2 случайной составляющей Δ_i носит название внутрिलाбораторной дисперсии. Она характеризует разброс результатов измерений при одинаковых условиях измерений. Такие измерения называют измерениями в условиях повторяемости (условия повторяемости – условия, при которых независимые результаты измерений получаются одним и тем же методом в одной и той же лаборатории одним и тем же оператором, с использованием одного и того же оборудования, в пределах короткого промежутка времени). Дисперсия σ_C^2 систематической погрешности Δ_{Ci} отражает различия между лабораториями, поэтому она называется межлабораторной дисперсией. Дисперсия суммы погрешностей $\Delta_i + \Delta_{Ci}$ характеризует разброс результатов измерений во всех лабораториях относительно среднего результата измерений M . Такие измерения называются измерениями в условиях воспроизводимости (условия воспроизводимости – условия, при которых результаты измерений получают одним и тем же методом, в разных лабораториях, разными операторами, с использованием различного оборудования).

Условия повторяемости и воспроизводимости отражают две основные ситуации, рассмотренные в стандартах ИСО 5725. Они определяют два

различных свойства, характеризующие прецизионность измерений: повторяемость и воспроизводимость. Количественно эти свойства выражаются стандартными (среднеквадратичными) отклонениями и доверительными пределами. Стандартное отклонение повторяемости σ_{Π} - стандартное отклонение результатов измерений, полученных в условиях повторяемости. Стандартное отклонение воспроизводимости $\sigma_{В}$ - стандартное отклонение результатов измерений, полученных в условиях воспроизводимости. Аналогично определяются и пределы: предел повторяемости Π – значение, которое с доверительной вероятностью 0,95 не превышает абсолютным значением разности двух результатов измерений, полученных в условиях повторяемости; предел воспроизводимости $В$ – значение, которое с доверительной вероятностью 0,95 не превышает абсолютным значением разности двух результатов измерений, полученных в условиях воспроизводимости.

Эти показатели характеризуют прецизионность измерений во всей рассматриваемой совокупности лабораторий. Поэтому они должны быть средними оценками. Вводятся они следующим образом. Стандартные отклонения повторяемости и воспроизводимости равны квадратному корню из соответствующих дисперсий σ_{Π}^2 и $\sigma_{В}^2$. Дисперсия повторяемости равна математическому ожиданию внутрилабораторной дисперсии по

совокупности всех лабораторий: $\sigma_{\Pi}^2 = M\left(\sigma_i^2\right)$. Дисперсия

воспроизводимости равна математическому ожиданию дисперсии, характеризующей разброс систематических погрешностей лабораторий в совокупности лабораторий. Поэтому она равна сумме дисперсии повторяемости и межлабораторной дисперсии:

$$\sigma_{В}^2 = M\left(\sigma_i^2 + \sigma_C^2\right) = \sigma_{\Pi}^2 + \sigma_C^2. \quad (8.2)$$

Отсюда следует соотношение между стандартными отклонениями повторяемости и воспроизводимости:

$$\sigma_B = \sqrt{\sigma_{\Pi}^2 + \sigma_C^2}. \quad (8.3)$$

Схема понятий, введенных в ИСО 5725, приведены в таблице 8.1.

8.2. Оценки повторяемости и воспроизводимости результатов измерений

Экспериментальное оценивание прецизионности метода измерений проводится следующим образом. Набор мер, представляющий q различных уровней величины (например, совокупность из q образцов одноименной смеси веществ, имеющих различную концентрацию основного компонента), посылается в r лабораторию. Каждая i -я лаборатория проводит в условиях повторяемости n_{ij} измерений на каждом уровне j . К измерениям, проводимым в лабораториях, предъявляются следующие требования:

- должна быть обеспечена взаимная независимость результатов n_{ij} параллельных измерений;
- каждая серия из n_{ij} параллельных измерений должна быть проведена в течение короткого интервала времени;
- измерения на всех q уровнях величины должны проводиться одним и тем же оператором, а на одном уровне – с использованием одного и того же оборудования;
- должен быть задан временной интервал проведения всех измерений.

При планировании эксперимента большое значение имеет выбор числа параллельных измерений n и числа лабораторий r , которые определяют масштабы эксперимента и точность полученных оценок.

Взаимосвязь основных понятий стандартов ИСО серии 5725

Свойства измерений	Точность		
	правильность	прецизионность	
		воспроизводимость	повторяемость
Погрешности измерений	Систематическая погрешность лаборатории $\Delta^I_{Ci} = \Delta^M_C + \Delta_{Ci}$		Случайная погрешность измерений Δ^0_i
	Систематическая погрешность метода измерений Δ^M_C	Лабораторная составляющая систематической погрешности Δ_{Ci}	
Оценки погрешности измерений	$\Delta^M_C = \bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{Ci}$	Межлабораторная дисперсия σ_C^2	1. Дисперсия повторяемости σ_{II}^2 (внутрилаборат. дисперсия).
Оценки погрешности измерений			2. Стандартное отклонение повторяемости σ_{II} .
			3. Предел повторяемости П.
		1. Дисперсия воспроизводимости $\sigma_B^2 = \sigma_{II}^2 + \sigma_C^2$.	
		2. Стандартное отклонение воспроизводимости σ_B .	
		3. Предел воспроизводимости В.	

Для обоснованного выбора этих показателей оценивают расширенную неопределенность результата оценивания стандартных отклонений повторяемости σ_{Π} и воспроизводимости σ_B . Она определяется формулой

$$P\{-A\sigma < S - \sigma < A\sigma\} = P, \quad (8.4)$$

где S – стандартное отклонение результатов измерений в выборке [13].

Для вероятности $P=0,95$ в стандарте приведены следующие оценки отклонений $S-\sigma$:

- для стандартного отклонения повторяемости

$$A_{\Pi}\sigma_{\Pi} = 1,96\sigma_{\Pi} \sqrt{\frac{1}{2p(n-1)}}; \quad (8.5)$$

- для стандартного отклонения воспроизводимости

$$A_B\sigma_B = 1,96\sigma_B \sqrt{\frac{p[1 + n(\gamma^2 - 1)] + (n-1)(p-1)}{2\gamma^4 n^2 p(p-1)}}, \quad (8.6)$$

где $\gamma = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\Pi}}$.

После формирования массива результатов измерений проводится его анализ с целью исключения выбросов, например, с использованием метода исключения промахов (гл.3.2). Затем определяют средние значения результатов измерений в базовых элементах (базовым элементом называют сочетание уровня величины и лаборатории), стандартные отклонения выборки базовых элементов и вычисляют выборочные оценки общего среднего значения, дисперсии повторяемости, межлабораторной дисперсии, дисперсии воспроизводимости.

Стандарт ИСО 5725-4 описывает основные способы оценки правильности измерений, которая возможна только тогда, когда принятое опорное значение величины X_0 (8.1) может быть установлено экспериментально, как ее действительное значение с применением эталонов

или стандартных образцов. В качестве стандартных образцов могут применяться:

- аттестованные стандартные образцы;
- материалы с известными свойствами;
- материалы, свойства которых были определены путем измерений альтернативным методом, известным, что его систематическая погрешность пренебрежимо мала.

Как было отмечено, характеристикой правильности измерений является систематическая погрешность. В стандарте рассматриваются два показателя правильности: систематическая погрешность метода измерений Δ_C^M и систематическая погрешность лаборатории Δ_{Ci} . Оценки систематических погрешностей методов измерений и лабораторий подробно приводятся в перечисленных выше стандартах, сопровождающих методических указаниях по использованию ИСО 5725, а также в монографиях [1, 9, 17, 18].

Рекомендованное использование пределов воспроизводимости V и повторяемости P (табл.8.1) результатов измерений, которое определяется с доверительной вероятностью 0,95, показывает абсолютные значения разности $|X_{ij} - X_{ik}|$ двух результатов X_{ij} и X_{ik} , полученных в условиях воспроизводимости и повторяемости соответственно.

Так как дисперсия разности двух случайных величин равна сумме их дисперсий, стандартное отклонение разности двух измерений в условиях повторяемости $\sigma = \sqrt{2} \sigma_{\Pi}$, где σ_{Π} - стандартное отклонение повторяемости. При нормальном распределении, которому, как правило, подчиняются случайные погрешности измерений, доверительной вероятности 0,95 соответствует квантиль $\lambda = 1,96$. Поэтому предел повторяемости

$$P = \lambda \sigma = 1,96 \cdot \sqrt{2} \sigma_{\Pi} = 2,77 \sigma_{\Pi} \cong 2,8 \sigma_{\Pi}. \quad (8.7)$$

Аналогично и предел воспроизводимости $B \cong 2,8\sigma_B$. Следовательно, критическое значение разности двух результатов измерений $|X_1 - X_2|$, выполненных в одной лаборатории

$$CD = \Pi = 2,8\sigma_{\Pi}, \quad (8.8)$$

а в разных лабораториях –

$$CD = B = 2,8\sigma_B. \quad (8.9)$$

Если в условиях повторяемости выполнены две группы измерений: n_1 измерений со средним значением \bar{X}_1 и n_2 измерений со средним значением \bar{X}_2 , то дисперсия разности $(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)$ составит $\sigma^2 = \sigma_{\Pi}^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)$.

Следовательно, критическая разность двух результатов многократных измерений $|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|$ в условиях повторяемости будет:

$$CD = 1,96 \cdot \sqrt{2}\sigma_{\Pi} \sqrt{\frac{1}{2n_1} + \frac{1}{2n_2}} = 2,8\sigma_{\Pi} \sqrt{\frac{1}{2n_1} + \frac{1}{2n_2}} = G \sqrt{\frac{1}{2n_1} + \frac{1}{2n_2}} \quad (8.10)$$

Полагая в этой формуле $n_1 = n_2 = 1$, получим выражение (8.7).

Современные системы качества продукции и услуг предусматривают постоянный контроль стабильности технологического процесса (в том числе контроль точности выполняемых измерений) с целью современного выявления моментов ухудшения его качества и устранения причин этого ухудшения. Контроль стабильности проводится на основе зависимости (8.10): если при двух последовательных измерениях контролируемого показателя качества результаты \bar{X}_i и \bar{X}_{i+1} многократных измерений (с числом измерений n_i и n_{i+1}) удовлетворяют условию

$$|\bar{X}_i - \bar{X}_{i+1}| \leq \Pi \sqrt{\frac{1}{2n_{i+1}} + \frac{1}{2n_i}}, \quad (8.11)$$

то такое расхождение между ними может быть обусловлено случайными погрешностями измерений. Поэтому считается, что контролируемый показатель качества не изменил свое значение. Если условие (8.11) не выполняется, необходимо провести новую настройку оборудования, либо принять другие меры по корректировке технологического процесса.

Этот анализ очень важен для контроля качества продукции с точки зрения его связи с оптимизацией и стабилизацией технологических процессов ее производства.

Такие подходы к определению правильности, воспроизводимости и прецизионности результатов измерений, не имеющих эталонного обеспечения, используются широко в современных системах качества измерительных, испытательных и сертификационных лабораториях, а также при контрольных, экспертных и спорных оценках достоверности получаемой измерительной информации.

Отдельной и очень важной задачей является разработка новых измерительных технологий, основанных на современных физических принципах, на базе сложных алгоритмов и программ. В результате создаются новые методы измерений и методики выполнения измерений (МВИ), при аттестации которых для внедрения в измерительную практику и согласования с ранее стандартизованными МВИ, необходимо использовать изложенные подходы [1].

Библиографический список

1. Фридман А.Э. Основы метрологии. Современный курс. – СПб.: НПО "Профессионал", 2008.
2. ГОСТ 16263-70 ГСИ. Метрология. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1984.
3. РМГ 29-99. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения.
4. МИ 2247-93. Государственная система обеспечения единства измерений.. Метрология. Основные термины и определения – СПб.: ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, 1994.
5. ГОСТ 8.417-02. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин.
6. Международный стандарт ИСО 31-2000. Величины и единицы.
7. Метрология, стандартизация, сертификация: учебник /под ред. В.В.Алексеева. – М.: "Академия", 2007.
8. Закон Российской Федерации "Об обеспечении единства измерений", № 102-ФЗ от 26.06.2008.
9. Сергеев А.Г., Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация: учеб. пособие. – М.: Логос, 2004.
10. Бегунов А.А. Метрологические основы аналитики. – СПб.: "Рим", 2004.
11. ГОСТ Р 8.563-96. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений.
12. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами: учеб. пособие. – СПб.: "Профессия", 2009.
13. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. 2nd ed., Geneva, ISO, 1995. Руководство по выражению неопределенности измерения/ пер. с англ. СПб.: ВНИИМ им Д.И.Менделеева, 1999.
14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. учебник – М.: Государственное изд-во физ.-мат. литературы, 1962.
15. ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
16. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности СИ. Общие требования.
17. Сирая Т.Н. МСС: Погрешность измерений: учеб. пособие – СПб.: СПбГЛА, 2010.
18. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерений с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.
19. Лячев В.В., Сирая Т.Н., Довбета Л.И. Фундаментальные основы метрологии – СПб.: "Элмор", 2007.
20. Шишкин И.Ф., Станякин В.М. Квалиметрия и управление качеством: учебник. - М.: Изд-во ВЗПИ, 1992.
21. Грановский В.А. Динамические измерений. – Л.: СЗПИ, 1987

Оглавление

Введение	3
Раздел 1. Теоретические основы метрологии	5
Глава 1. Основные понятия метрологии	5
1.1. Физические свойства, величины и шкалы	5
1.2. Понятие измерения, качественная и количественная характеристики физических величин	10
1.3. Международная система единиц (система СИ). Воспроизводимость и передача размера единиц. Эталоны единиц системы СИ.	17
Глава 2. Общие сведения об измерениях физических величин	34
2.1. Классификация и области измерений	34
2.2. Обеспечение единства измерений. Основные метрологические операции	38
2.3. Принципы, методы и методики выполнения измерений	40
2.4. Общие сведения о средствах измерений	45
2.5. Измерительные сигналы и их преобразование	49
Глава 3. Основы теории погрешностей	53
3.1. Определение и классификация погрешностей результатов измерений	53
3.2. Систематические, случайные погрешности и промахи	59
3.3. Неопределенность результатов измерений	67
3.4. Погрешности результатов прямых, косвенных, совокупных и совместных измерений	72
3.5. Суммирование погрешностей	86
Глава 4. Метрологические характеристики СИ и их нормирование	90
4.1. Метрологические характеристики средств измерений	90
4.2. Модели изменения погрешности вдоль функции преобразования	101
4.3. Нормирование метрологических характеристик средств измерений	103
Раздел 2. Основы законодательной метрологии	114
Глава 5. Общие сведения	114
5.1. Задачи законодательной метрологии	114
5.2. Основы метрологического обеспечения систем контроля, измерения и управления	116
Глава 6. Метрологические службы и организации	124
6.1. Государственная метрологическая служба	124
6.2. Международные метрологические организации	127
Раздел 3. Основы практической метрологии	131
Глава 7. Прикладное обеспечение единства и качества измерений	131
7.1. Государственный метрологический контроль и надзор	131
7.2. Основные метрологические операции обеспечения качества измерений	133
Глава 8. Обеспечение точности результатов измерений	140
8.1. Определение прецизионности и правильности результатов измерений	140
8.2. Оценки повторяемости и воспроизводимости результатов измерений	145
Библиографический список	151

Учебное издание

Галина Анатольевна Кондрашкова
Анна Владимировна Черникова
Ирина Владимировна Бондаренкова
Георгий Александрович Кнодель
Игорь Сергеевич Ковчин
Валерий Петрович Яковлев

МЕТРОЛОГИЯ

Учебное пособие

Редактор и корректор Т.А.Смирнова
Техн. редактор Л.Я.Титова

Темплан 2011 г, поз. 47

Подп. к печати 19.09.11 Формат 60 х 84 / 16. Бумага тип. № 1. Печать
офсетная. Печ.л. 9,75 Уч.- изд. л. 9,75 Тираж 150 экз. Изд. № 47.
Цена «С». Заказ

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического
университета растительных полимеров 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана
Черных, 4