

## ВВЕДЕНИЕ

**П**рактическое решение вопросов комплексной автоматизации сложных технологических процессов относится к числу актуальных задач химической, пищевой и других отраслей промышленности. В настоящее время в промышленной автоматизации сформировалась устойчивая тенденция к переходу от автономных распределенных систем управления к интегрированным системам управления промышленным производством в целом. Большая роль в повышении качества выпускаемой продукции в условиях автоматизированных производств принадлежит средствам контроля состава и качества исходных материалов, полупродуктов и конечного продукта.

Непрерывное усложнение химических соединений, используемых в производстве, резкое повышение требований к чистоте промежуточных продуктов, общая интенсификация технологических процессов — все это делает проблему автоматического контроля качественных показателей достаточно трудной. Роль аналитических средств измерения на предприятиях химической, нефтегазовой, пищевой, угледобывающей промышленности весьма велика.

Основными продуктами нефтегазовой отрасли, концентрацию которых контролируют аналитическими приборами, являются углеводороды, сероводород, кислород, угарный газ и другие компоненты. В химической промышленности контролируют концентрацию водорода, окиси этилена, ацетона, сероводорода, оксида азота и других газов. На предприятиях горнодобывающей промышленности чаще используют приборы, контролирующие концентрацию метана и водорода. В других промышленных сферах, например в энергетике, контролируют концентрацию угарных газов, дымовых газов, водорода и т. д.

В современных условиях в Едином государственном реестре средств измерений зарегистрировано до 200 производителей

аналитического оборудования. Из них более 40% — российские производители. Характерно, что во многих российских регионах представлены мировые лидеры по производству аналитической техники, такие как Drager, ISC–Oldham, Siemens, Endress + Hauser, Mettler Toledo, ABB, Yokogawa и другие фирмы.

Отечественные производители изготавливают почти все типы аналитической аппаратуры, применяемой в промышленности. Среди таких компаний можно отметить «Аналитприбор» (Смоленск), «Оптек» (С.-Петербург), НПП «ИЭЛРАН-ЭКОНИКС» (Москва), «Автоматика» (Владимир), «Элемер» (Зеленоград), «Химавтоматика» (Москва), СКБ «Хроматек» (Йошкар-Ола) и многие другие.

К сожалению, основная масса промышленных российских предприятий приобретает аналитические средства контроля для анализа воздуха рабочей зоны и мониторинга экологической обстановки для того, чтобы пройти проверку государственных надзорных служб. Побуждающим фактором становится угроза отзыва лицензии или получение штрафов, тогда как стимулом должна стать безопасность и работоспособность персонала.

Однако в последние годы с развитием международного сотрудничества все большее количество предприятий приходит к необходимости применения поточных (промышленных) анализаторов. Этому способствуют высокие метрологические характеристики приборов, их высокая надежность, самодиагностика, самоочистка контактирующих элементов приборов, длительный срок эксплуатации.

Предлагаемое учебное пособие посвящено рассмотрению, анализу и обсуждению, в основном, промышленных анализаторов состава и качества технологических сред.

Первым учебником, посвященным средствам контроля состава и качества технологических сред, была книга М. В. Кулакова, А. В. Казакова, М. В. Шелястина. «Технологические измерения и аналитические приборы в химической промышленности» [1], которая издана в 1964 г. В дальнейшем подобный материал был освещен (наряду с другими средствами контроля) в учебниках [2, 3, 4].

В связи с непрерывным совершенствованием конструкций современных средств измерения автор стремился сконцентрировать внимание читателей на принципиальных особенностях приборов, их характеристиках и особенностях практического использования.

Книга может служить справочным пособием и ориентиром для специалистов промышленных предприятий при выборе аналитических приборов.

Как автор выражаю большую благодарность Е. Г. Соболевой, Ю. И. Гришину и Т. А. Рябковой за помощь в оформлении материалов для книги.

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРАХ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

## 1.1. ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

**Л**юбая отрасль промышленности не может существовать без развитой системы измерений, позволяющей контролировать качество выпускаемой продукции, выполнять многочисленные исследования и оптимизацию технологических процессов, создавать новые, совершенные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП). Для этого необходимо измерять очень большое число различных физических величин, характеризующих технологические параметры.

С позиции метрологии физическая величина — свойство общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта [2].

При нахождении искомого значения физической величины ее сравнивают с физической величиной, принятой за единицу измерения, т. е. получают результат измерения:

$$Z = Ax \cdot \Delta X, \quad (1.1)$$

где  $\Delta X$  — единица измерения;  $Ax$  — числовое значение измеряемой величины.

Уравнение (1.1) называется основным уравнением измерения. Измерение — это всегда экспериментальное исследование, так как измеряемая физическая величина не может быть измерена вне физического явления, в котором она проявляется.

**Физическая величина** — одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

**Размер физической величины** — количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, явлению или процессу.

**Значение физической величины** — выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

**Единица измерения физической величины** — физическая величина фиксированного размера, которой присвоено числовое значение, равное единице, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

При измерениях используют понятия истинного и действительного значения физической величины. **Истинное значение физической величины** — значение величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину. Истинное значение физической величины может быть соотнесено с понятием абсолютной истины. Его можно получить только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений. **Действительное значение физической величины** — это значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

**Измерение физических величин.** Измерение — совокупность операций с применением технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Например, прикладывая линейку с делениями к какой-либо детали, по сути, сравнивают ее размер с единицей, хранимой линейкой, и, производя отсчет, получают значение величины (длины, высоты, толщины и других параметров детали); с помощью измерительного прибора сравнивают размер величины, преобразованной в перемещение указателя, с единицей, хранимой шкалой этого прибора, и проводят отсчет.

Приведенное определение понятия «измерение» удовлетворяет общему уравнению измерений, что имеет существенное значение при упорядочении системы понятий в метрологии.

В этом понятии учтена техническая сторона (совокупность операций), раскрыта метрологическая суть измерений (сравнение с единицей) и показан гносеологический аспект (получение значения величины). В тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая и не определена единица измерения этой величины), практикуется оценивать такие величины по условным шкалам (например, шкала Мооса для определения твердости минералов, содержащая 10 условных чисел твердости).

**Характеристики измерений.** Наиболее важные среди них: принцип и метод измерения, результат, погрешность, точность, сходимость, воспроизводимость, правильность и достоверность.

**Метод измерения** — прием или совокупность приемов сравнения измеряемой физической величины с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерений. Пример: измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями (мерами массы с известным значением).

**Результат измерения** — значение величины, полученное путем измерения.

Погрешность результатов измерений — отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Высокая точность измерения соответствует малым погрешностям. Количественно точность оценивают обратной величиной модуля относительной погрешности: например, если относительная погрешность составляет 0,01, то точность равна 100.

**Сходимость результатов измерений** — близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, которые выполнены повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью. Сходимость измерений отражает влияние случайных погрешностей на результат измерения.

**Воспроизводимость** — близость результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами, разными операторами, в разное время, но приведенных к одним и тем же условиям (температура, давление, влажность и др.).

**Правильность** — характеристика качества измерений, отражающая близость к нулю систематических погрешностей в их результатах.

**Достоверность** — характеристика качества измерений, отражающая доверие к их результатам.

Значительное разнообразие технологических параметров вынуждает использовать на практике различные принципы, виды и методы измерений.

Под **принципом измерений** понимают совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Например, в основу принципа действия измерения достаточно высоких температур положен термоэлектрический эффект. Измерение расхода газа или жидкости основано на другом физическом принципе — перепаде давления на сужающем устройстве.

По способу получения значения измеряемой физической величины различают четыре основных вида измерений: прямые, косвенные, совокупные и совместные.

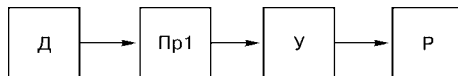
**Прямые измерения** — это измерения, при которых искомое значение получают непосредственно по показанию измерительного прибора, например толщины детали — микрометра, температуры сушильного агента — термометра и т. п. Прямые измерения являются основой сложных видов измерений.

При реализации прямых измерений измерительная цепочка, как правило, состоит из последовательного соединения звеньев измерительного канала (рис. 1.1)

Такая схема характеризуется простотой исполнения, но в то же время суммарная погрешность такой схемы, складываясь из отдельных погрешностей, растет по величине, поэтому очень часто эту цепочку модернизируют, добавляя обратную связь (см. рис. 1.2).

Рис. 1.1  
Измерительная схема  
прямого преобразователя:

Д — датчик; Пр1 — промежуточный преобразователь; У — усилитель; Р — регистрирующий прибор.



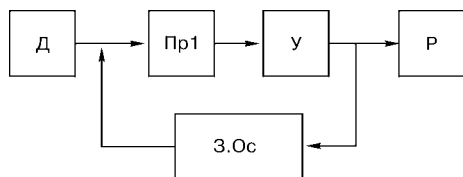


Рис. 1.2  
Измерительная схема со звеном обратной связи (З.Ос — звено обратной связи)

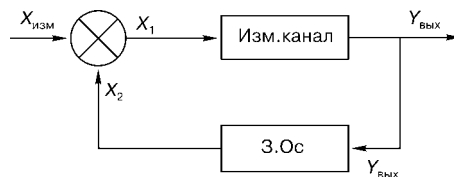


Рис. 1.3  
Расчетная схема измерительного канала с обратной связью

В зависимости от того, положительная эта связь или отрицательная, существенно меняются характеристики измерительного канала (рис. 1.3).

$$\begin{aligned} y_{\text{вых}} &= k_1 \cdot x_1; x_1 = x_{\text{изм}} \pm x_2; \\ x_2 &= y_{\text{вых}} \cdot k_2; y_{\text{вых}} = k_1 \cdot (x_{\text{изм}} \pm k_2 \cdot y_{\text{вых}}); \\ \frac{y_{\text{вых}}}{x_{\text{изм}}} &= \frac{k_1}{1 \pm k_1 \cdot k_2} = k_{\Sigma}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Под коэффициентом преобразования  $k_{\Sigma}$  отдельных звеньев понимается величина соотношения выходного и входного сигналов. Применительно к данной схеме оно равно суммарному коэффициенту преобразования цепи с обратной связью.

Знак «-» характеризует положительную обратную связь, знак «+» — отрицательную. Выясним свойства положительной и отрицательной связей.

Для оценки положительной обратной связи рассмотрим пример. Задан  $k_1 = 10$ ,  $k_2 = 0,05$ , тогда  $k_{\Sigma} = 20$ , т. е. положительная обратная связь повышает усилительные свойства цепи с обратной связью.

Для отрицательных обратных связей всегда можно подобрать, чтобы  $k_1 k_2 \gg 1$ , тогда  $k_{\Sigma} = \frac{1}{k_2}$ . Это означает, что, используя в прямой цепочке звенья с недостаточно высокими метрологическими характеристиками, но применяя отрицательную обратную связь, суммарные метрологические параметры будут определяться главным образом параметрами блока обратной связи.

**Косвенные измерения** — это измерения, при которых результат находят на основании известной зависимости между измеряемой величиной и величинами-аргументами:

$$Z = f(X_1, X_2, \dots, X_m). \quad (1.3)$$

Значения аргументов  $X_1, \dots, X_m$  находят в результате прямых или любых других видов измерений.

При **совокупных и совместных** измерениях искомые значения вычисляются путем решения системы уравнений:

$$\begin{aligned} f_1(Z_1, \dots, Z_m, Z_{11}, \dots, Z_{1n}) &= 0; \\ f_2(Z_1, \dots, Z_m, Z_{21}, \dots, Z_{2n}) &= 0; \\ f_k(Z_1, \dots, Z_m, Z_{k1}, \dots, Z_{kn}) &= 0; \end{aligned} \quad (1.4)$$

где величины  $Z_{11}, \dots, Z_{kn}$  измеряют прямыми измерениями.

Различие совокупных и совместных измерений заключается в том, что при совокупных измеряют несколько одноименных, а при совместных — несколько неоднородных величин. Примером совместных измерений является определение коэффициентов  $R_t$ ,  $A$ ,  $B$  и  $C$  уравнения.

$$R_t = R_0 [1 + A(t - t_0) + B(t - t_0)^2 + C(t - t_0)^3], \quad (1.5)$$

которое описывает зависимость сопротивлений  $R_t$  платинового термометра от температуры  $t$ . В простейшем случае достаточно выполнить измерения  $R_t$  4 раза при различных  $t$  и затем вычислить искомые  $R_0$ ,  $A$ ,  $B$  и  $C$ . В более сложных случаях число измерений превышает число измеряемых параметров.

Косвенные, совокупные и совместные виды измерения позволяют решать гораздо более сложные задачи по сравнению с прямыми измерениями. В последнее время их широко используют в системах автоматического контроля, в которых необходимые вычисления реализуются средствами микропроцессорной техники.

Измерения технологических параметров осуществляют различными методами (ГОСТ 16263-70). Различают методы прямого и уравнивающего преобразования. Понятие «метод измерения» характеризуется совокупностью приемов использования принципов и средств измерения. При **прямом преобразовании** средства измерения преобразуют измерительный сигнал  $Z$  только в прямом направлении со входа на выход. При этом используют одновременно все звенья применяемого средства измерения. Результат измерения получают по показанию заранее отградуированного в соответствующих единицах прибора. Основная операция здесь: сравнение выходного измерительного сигнала со шкалой. Погрешности метода прямого преобразования по мере прохождения сигнала по цепочке преобразователей (звеньев) возрастают, так как каждое преобразование вносит свой вклад в общую погрешность.

Значительно большую точность можно получить при использовании **метода уравнивающего преобразования**.

Метод уравнивания имеет следующие разновидности: разностный (дифференциальный), нулевой метод и замещения.

**Разностный метод** не требует применения сравнительно дорогих регулируемых мер. Вместо них применяют нерегулируемую меру некоторого фиксированного значения, в результате чего происходит неполное уравнивание измерительного сигнала. Разность между выходным сигналом измерительного преобразователя и сигналом от нерегулируемой меры  $x_0$  измеряется методом прямого преобразования  $\Delta x = x_{\text{вх}} - x_0$ .

На рис. 1.4 показана структурная дифференциальная схема измерения: 1 — метрологически аттестованное средство измерения, обеспечивающее постоянство значений действительной величины  $x_0$ , 2 — регистрирующий прибор, 3 — сумматор,  $x_{\text{вх}}$  — измеряемая

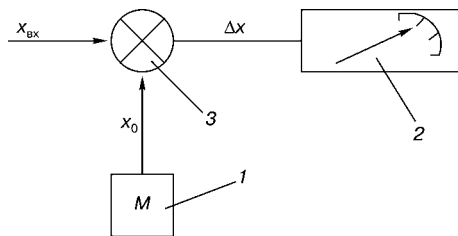


Рис. 1.4  
Структурная дифференциальная схема измерения

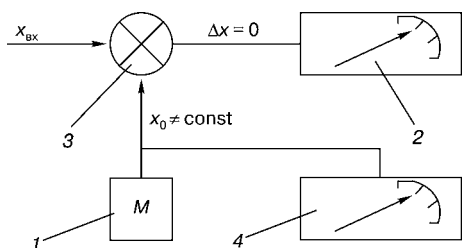


Рис. 1.5  
Измерительная схема по методу  
нулевого сравнения

величина, например давление. В процессе измерения происходит сравнение текущего значения измеряемой величины с ее действительным значением  $x_0$ . Разность этих значений  $\Delta x$  характеризует однозначно измеряемую величину.

В связи с тем что этот метод имеет признаки как уравнивающего, так и прямого преобразования, разностный метод иногда относят к промежуточной разновидности.

Точность разностного метода при использовании показывающих приборов одинаковой точности много выше точности метода прямого преобразования.

На рис. 1.5 показана схема измерения по методу нулевого сравнения. В этом случае обеспечивается постоянство разности величин на уровне нуля ( $\Delta x = 0$ ). Это достигается за счет изменения действительного значения  $x_0$ . В этой схеме 2 — нуль-индикатор, 4 — регистрирующий прибор, шкала которого градуируется в значениях  $x_{вх}$ , т. е. измеряемой величины. Позиция 3 идентична позиции на рис. 1.4. Позиция 1 — метрологически аттестованное средство измерения с изменяющейся действительной величиной.

## 1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

**Средство измерений (СИ)** — техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени. Данное определение раскрывает суть средства измерений, заключающуюся, во-первых, в «умении» хранить (или воспроизводить) единицу физической величины; во-вторых, в неизменности размера хранимой единицы. Эти важнейшие факторы и обуславливают возможность выполнения измерения (сопоставление с единицей), т. е. «делают» техническое средство средством измерений. Если размер единицы в процессе измерений изменяется более, чем установлено нормами, таким средством нельзя получить результат с требуемой точностью. Это означает, что измерять можно лишь тогда, когда техническое средство, предназначенное для этой цели, может хранить единицу, достаточно неизменную по размеру (во времени).

Средства измерений классифицируют в зависимости от назначения и метрологических функций.

По назначению СИ подразделяют на меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы, измерительные установки и измерительные системы [1, 2].

**Мера** — СИ, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения



которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Различают меры:

- **однозначные** — воспроизводящие физическую величину одного размера (например, ЭДС нормального элемента равна 1,0185 В);
- **многозначные** — воспроизводящие физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины);
- **набор мер** — комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для практического применения как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины);
- **магазин мер** — набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

**Измерительный преобразователь** — техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину, или измерительный сигнал, удобный для обработки. Это преобразование должно выполняться с заданной точностью и обеспечивать требуемую функциональную зависимость между выходной и входной величинами преобразователя. Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо СИ.

Измерительные преобразователи могут быть квалифицированы по различным признакам, например:

- по характеру преобразования различают следующие виды измерительных преобразователей: электрических величин в электрические (шунты, делители напряжения, измерительные трансформаторы и пр.), магнитных величин в электрические (измерительные катушки, преобразователи, основанные на эффектах Холла, Гаусса, феррозонды); неэлектрических величин в электрические (термо- и тензопреобразователи, реостатные, индуктивные, емкостные и т. д.);
- по месту в измерительной цепи и функциям различают первичные, промежуточные, масштабные и передающие преобразователи.

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

Измерительные приборы подразделяются:

- по форме регистрации измеряемой величины — на аналоговые и цифровые;
- по применению — амперметры, вольтметры, частотомеры, фазометры, осциллографы и др.;
- назначению — приборы для измерения электрических и неэлектрических (магнитных, тепловых, химических и др.) физических величин;
- действию — интегрирующие и суммирующие;
- способу индикации значений измеряемой величины — показывающие, сигнализирующие и регистрирующие;

- методу преобразования измеряемой величины — непосредственной оценки (прямого преобразования) и сравнения;
- способу применения и по конструкции — щитовые, переносные и стационарные;
- защищенности от воздействий внешних условий — обыкновенные, влаго-, газо-, пылезащищенные, герметичные, взрывобезопасные и др.

**Измерительная установка (ИУ)** — совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, и других устройств, предназначенных для измерений одной или нескольких физических величин и расположенных в одном месте. ИУ, применяемую для поверки, называют поверочной установкой, а входящую в состав эталона — эталонной установкой. Некоторые большие ИУ называют измерительными машинами.

В качестве примера можно назвать установки для измерения удельного сопротивления электротехнических материалов; для испытаний магнитных материалов.

**Измерительная система (ИС)** — совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта с целью измерения одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях. В зависимости от назначения ИС подразделяют на информационные, контролирующие, управляющие и др. Пример такой ИС — радионавигационная система для определения местонахождения различных объектов, которая состоит из ряда измерительно-вычислительных комплексов, разнесенных в пространстве на значительное расстояние друг от друга.

**Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК)** — функционально-объединенная совокупность средств измерений, ЭВМ и вспомогательных устройств, предназначенных для выполнения в составе измерительной системы конкретной измерительной задачи.

По метрологическим функциям СИ подразделяются на эталоны и рабочие средства измерений.

Рабочие средства предназначены для измерения параметров и характеристик объектов контроля.

**Эталон единицы физической величины** — средство измерений (или комплекс средств измерений), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

Конструкция эталона, его свойства и способ воспроизведения единицы определяются природой данной физической величины и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать по крайней мере тремя тесно связанными друг с другом существенными признаками — неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

### 1.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

К ним относятся точность измерения, чувствительность контроля, быстродействие преобразования параметра, надежность процесса измерения, энергопотребления, ремонтпригодность.

**Точность** измерения характеризуется для каждого прибора классом точности. В свою очередь, класс точности определяется величиной относительной приведенной погрешности

$$A_n = \frac{x_u - x_0}{L} \cdot 100\%, \quad (1.6)$$

где  $A_n$  — относительная приведенная погрешность;  $x_u$  — текущее значение измеряемого параметра;  $x_0$  — действительное значение измеряемого параметра;  $L$  — нормирующее значение шкалы измеряемого прибора. Если  $A_n = 2,5\%$ , то класс точности равен 2,5.

Классы точности 4.0; 2.5; 2.0; 1.0; 0.5; 0.25 характеризуют рабочие средства измерения, а классы точности от 0.05 до 0.005 — образцовые средства измерения (эталон).

Кроме относительной приведенной погрешности, в практике измерений используется относительная погрешность

$$A_n = \frac{x_u - x_0}{x_u} \cdot 100\%. \quad (1.7)$$

Она дает оценку точности в конкретной точке шкалы, а относительная приведенная погрешность — во всем диапазоне шкалы.

Основные способы установления пределов допускаемых погрешностей и обозначения классов точности средств измерений установлены ГОСТ 8.401-80. Основная погрешность СИ нормируется четырьмя различными способами. Чтобы четко уяснить себе эти различия и грамотно использовать нормируемые значения при расчете погрешностей результатов измерения, необходимо рассмотреть характер изменения относительной и абсолютной погрешности СИ в диапазоне значений измеряемой величины и обусловленные этим положения стандартов, регламентирующих нормирование погрешностей СИ.

Основное различие в способах нормирования обусловлено разным соотношением аддитивной и мультипликативной составляющих в погрешности тех или иных СИ.

При чисто мультипликативной полосе погрешностей СИ абсолютная погрешность  $\Delta(x)$  возрастает прямо пропорционально текущему значению измеряемой величины. Поэтому относительная погрешность, т. е. погрешность чувствительности такого преобразователя,  $\gamma_s = \frac{\Delta(x)}{x}$  оказывается постоянной величиной при любом значении  $x$  и ее удобно использовать для нормирования погрешностей преобразователя и указания его класса точности.

Однако реально таких преобразователей не существует, так как невозможно создать преобразователь, полностью лишенный аддитивных погрешностей.

Эти погрешности от шума, дрейфа, трения, наводок, вибраций и т. п. неизбежны в любых типах СИ. Поэтому для реальных СИ, погрешность которых нормируется лишь одним числом — погрешностью чувствительности  $\gamma_s$  — всегда указываются границы рабочего диапазона, в которых такая оценка остается приблизительно справедливой.

При чисто аддитивной полосе погрешностей остается неизменной для любых значений  $X$  граница абсолютной погрешности нуля  $\Delta(x) = \Delta_0 = \text{const}$ . Но нормировать абсолютное значение погрешности неудобно, так как для многопредельных приборов оно будет различным для каждого поддиапазона, и в паспорте прибора пришлось бы перечислять эти значения для всех поддиапазонов.

Поэтому нормируют не абсолютное значение  $\Delta_0$ , а приведенное значение этой погрешности:

$$\gamma_0 = \frac{\Delta_0}{X_N}, \quad (1.8)$$

где  $X_N$  — так называемое нормирующее значение измеряемой величины.

Значение приведенной погрешности  $\gamma_0$ , выраженное в процентах, используется для обозначения класса точности таких СИ.

Однако полагать, как уже указывалось, что вольтметр класса точности 1,0 обеспечивает во всем диапазоне измерений получение результатов с погрешностью  $\pm 1\%$ , — грубейшая ошибка. В действительности текущее значение относительной погрешности  $\gamma_x = \frac{\Delta_0}{x}$ , т. е. растет обратно пропор-

ционально  $X$  и изменяется по гиперболе (рис. 1.6). Таким образом, относительная погрешность  $\gamma(x)$  равна классу точности прибора  $\gamma_0$  лишь на последней отметке шкалы (при  $x = X_k$ ). При  $x = 0,1 X_k$  она в 10 раз больше  $\gamma_0$ , а при дальнейшем уменьшении  $x$  стремится к бесконечности.

При уменьшении измеряемой величины  $x$  до значения абсолютной погрешности нуля  $\Delta_0$  относительная погрешность результата измерения достигает

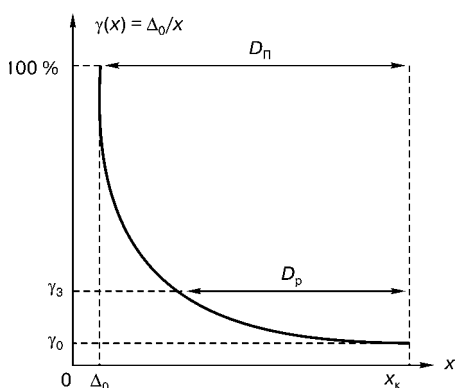


Рис. 1.6  
Зависимость относительной погрешности от диапазона измерения

$$\gamma(x) = \frac{\Delta_0}{x} = \frac{\Delta_0}{\Delta_0} = 1 = 100\%. \quad (1.9)$$

Такое значение измеряемой величины, когда  $x = \Delta_0$  и  $\gamma(x) = 100\%$ , называется порогом чувствительности СИ.

Отсюда полный диапазон  $D_p$  измеряемых величин для любого преобразователя ограничивается снизу порогом чувствительности, а сверху — пределом измерений. Так как в области малых значений  $x$  погрешность измерений очень велика, то рабочий диапазон  $D_p$  ограничивают снизу таким значением  $x$ , где относительная погрешность измерений  $\gamma(x)$  не превосходит еще некоторого заранее заданного значения  $\gamma_3$ , равного, например, 4, 10 или 20%.

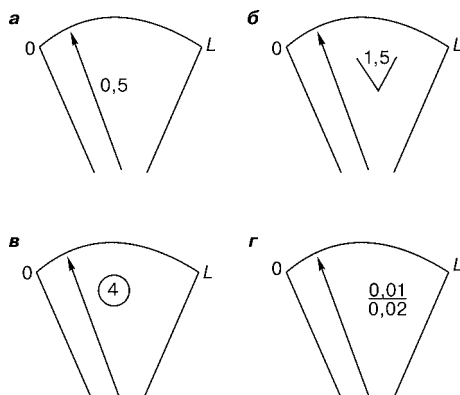


Рис. 1.7  
Виды обозначений классов точности

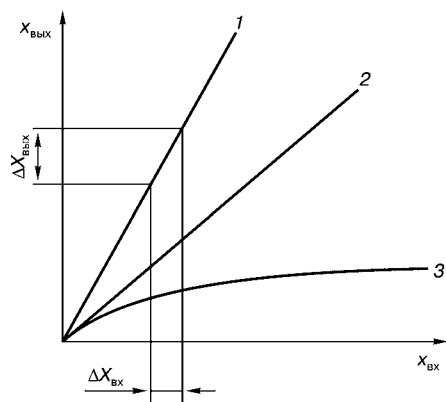


Рис. 1.8  
Статическая характеристика  
средств измерений

Таким образом, рабочий диапазон назначается достаточно произвольно и составляет только некоторую часть полного диапазона СИ. В начальной же части шкалы измерения недопустимы, в чем и заключается отрицательное влияние аддитивной погрешности, не позволяющее использовать один и тот же преобразователь для измерения как больших, так и малых измеряемых величин.

На шкалах приборов могут быть следующие обозначения классов точности (рис. 1.7). Здесь *а*) — когда *L* в единицах некоторой размерности (градусах, миллиметрах и т. д.), оценка точности проводится по относительной приведенной погрешности; *б*) — когда *L* в процентах, оценка точности проводится по относительной приведенной погрешности; *в*) — характерно для электроизмерительных приборов (вольтметр, амперметр и др.), оценка точности проводится по относительной погрешности; и, наконец, *г*) — характерно для частотомеров, 0,01—с, 0,02—д.

Иногда указывается абсолютная погрешность, это характерно для измерительной массы.

**Чувствительность** — это отношение величины изменения выходного параметра к величине изменения входного параметра:

$$S = \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dx_{\text{ВХ}}}. \quad (1.10)$$

В инженерной практике часто под *S* понимают величину  $S = \Delta X_{\text{ВЫХ}} / \Delta X_{\text{ВХ}}$ .

Чувствительность может быть найдена расчетным путем или на основе статических характеристик приборов, определяемых экспериментально (рис. 1.8).

Из анализа статических характеристик видно, что с увеличением крутизны характеристик чувствительность приборов увеличивается, для нелинейных характеристик чувствительность переменная. В связи с этим при конструировании средств измерения стремятся выделить линейную часть характеристики, обеспечивая при этом равномерность шкалы.

Размерность чувствительности, как правило, сложная и включает размерность выходных и входных параметров.

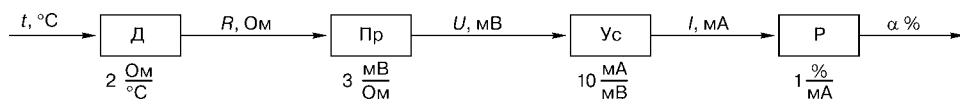


Рис. 1.9

Структурная схема преобразования параметров:

Д — датчик; Пр — преобразователь; Ус — усилитель; Р — регистрирующее устройство.

Пример.

Рассмотрим прибор измерения температуры (рис. 1.9).

Суммарная чувствительность найдется как произведение чувствительности звеньев

$$S_{\Sigma} = S_D \cdot S_{Пр} \cdot S_{Ус} \cdot S_P = 60\% / ^\circ\text{C}. \quad (1.11)$$

При параллельном соединении звеньев в приборе суммарная чувствительность находится как сумма чувствительностей отдельных звеньев.

Если вся измерительная цепь или часть ее охвачена отрицательной обратной связью, то суммарная чувствительность определится

$$S_{\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{1 + S_{oc} \cdot S_{\Sigma}}, \quad (1.12)$$

а если положительной, то

$$S_{\Sigma} = \frac{S_{\Sigma}}{1 - S_{oc} \cdot S_{\Sigma}}, \quad (1.13)$$

где  $S_{\Sigma}$  — чувствительность цепи;  $S_{oc}$  — чувствительность звена обратной связи.

Таким образом, чувствительность измерительных приборов во многом определяет возможности их использования в практике измерений.

При низкой чувствительности оказывается невозможным с высокой достоверностью характеризовать характер изменения параметра. При чрезмерно высокой чувствительности малейшие помехи могут искажать работу приборов.

Существует понятие порога чувствительности — это минимальное значение измеряемой величины, которое приводит к видимому изменению выходного параметра прибора (например, движение стрелки по шкале).

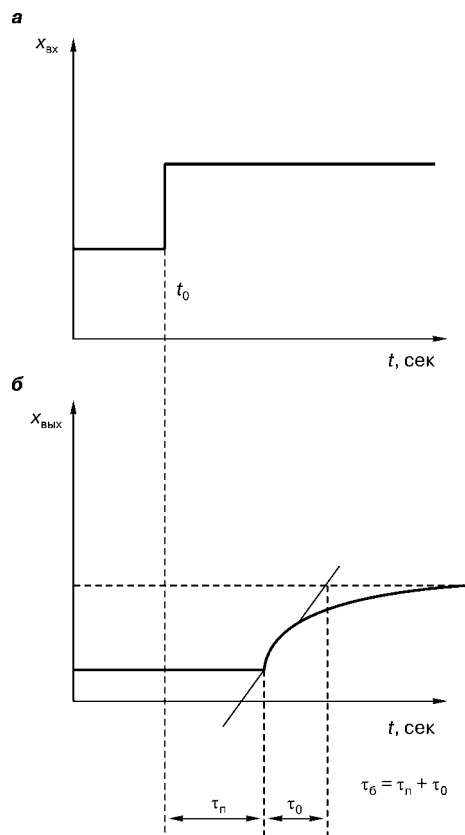


Рис. 1.10

Динамические характеристики средства измерения

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)