

## Глава 2

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЯ

### 2.1. Методы измерений

Вопросами теории измерений, средствами обеспечения их единства и способами достижения необходимой точности занимается наука метрология.

Метрология определяет измерение как познавательный процесс, заключающийся в нахождении соотношения между измеряемой величиной и другой величиной, условно принятой за единицу измерения. Так, если  $k$  – измеряемая величина,  $a$  – единица измерения, а  $m$  – числовое значение измеряемой величины в принятой единице, то

$$k = ma. \quad (2.1)$$

Это уравнение является основным уравнением измерения. Правая часть равенства (2.1) представляет собой результат измерения. Результат всякого измерения является именованным числом и состоит из единицы измерений, имеющей название, и числа  $m$ , показывающего, сколько раз данная единица содержится в измеряемой величине.

В теории измерений различают прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения.

*Прямые измерения*, характеризуемые равенством (2.1), заключаются в непосредственном сравнении измеряемой величины с единицей измерения при помощи меры или измерительного прибора со шкалой, выраженной в этих единицах. Большую часть физических величин определяют не путем непосредственных измерений, а с помощью вычислений, пользуясь известными функциональными зависимостями.

Измерения, при которых искомую измеряемую величину определяют вычислениями по результатам прямых измерений, связанных с искомой величиной известной функциональной зависимостью, называют *косвенными измерениями*. При этом значение измеряемой величины определяют по формуле

$$Q = f(A, B, C, \dots), \quad (2.2)$$

где  $A, B, C$  – значения величин, полученные при прямых измерениях. Примерами косвенных измерений могут служить: определение объема тела по прямым измерениям его геометрических размеров, расхода вещества, протекающего в трубопроводе, по перепаду давлений на дроссельном устройстве и т.п. Косвенные измерения представляют самый многочисленный ряд измерений.

*Совокупными измерениями* называют такие, при которых искомые значения величин находят с помощью системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин.

*Совместными измерениями* называются производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднoименных величин для нахождения зависимости между ними.

Измерение определяется принципом и методом.

Под *принципом* измерений подразумевают совокупность физических явлений, на которых основаны измерения. Например, измерение температуры с использованием термоэлектрического эффекта.

*Методом* измерения называют совокупность приемов и средств измерения. В современной теории измерений различают следующие основные методы, принципиально отличные друг от друга.

*Метод непосредственной оценки* предусматривает определение искомой величины по отсчетному устройству измерительного прибора.

*Метод сравнения* основан на сравнении измеряемого значения величины со значением величины, воспроизводимой мерой<sup>1</sup>. Разновидностями метода сравнения являются методы: дифференциальный, нулевой, замещения и совпадений.

*Дифференциальный метод* заключается в таком сравнении с мерой, при котором на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой.

*Нулевой метод* заключается в таком сравнении с мерой, при котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводится до нуля.

*Метод замещения* основан на сравнении с мерой, когда измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

*Метод совпадений* также основан на сравнении с мерой, причем разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических отметок.

## **2.2. Характеристика средств измерения**

В состав измерительной аппаратуры входят меры, измерительные приборы и вспомогательные устройства. По назначению меры и измерительные приборы бывают образцовыми и рабочими.

---

<sup>1</sup> Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

*Образцовые меры и измерительные приборы* служат для воспроизведения и хранения единиц измерения, а также для градуировки и поверки рабочих измерительных устройств.

*Рабочие меры и измерительные приборы* предназначены для прямого или косвенного сравнения измеряемых величин с соответствующими единицами измерения или мерами и разделяются на две группы – лабораторные и технические. *Лабораторные меры и измерительные приборы* характеризуются установленной точностью, и при их применении в результате измерения следует вносить поправки в соответствии с паспортными данными, а также учитывать влияние внешних факторов. Для *технических мер и измерительных приборов* точность принимается заранее заданной, и в результате измерения, который считается точным в установленных технических условиях или государственными стандартами пределах нормируемых метрологических характеристик, не требуется вносить какие-либо поправки.

В общем случае под измерительным прибором понимается средство измерения, предназначенное для выработки сигналов измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. По способу выдачи информации измерительные приборы могут быть показывающими или регистрирующими, а при наличии устройств сигнализации – сигнализирующими.

Метрологические характеристики измерительных устройств, определяющие достоверность получаемой информации, т.е. главную функцию средств измерений, служат основными критериями их качества. В число нормируемых метрологических характеристик средств измерений входят следующие показатели:

1. Пределы измерения (в виде номинальной статической характеристики, наименьшей цены деления неравномерной шкалы измерительного устройства, выходного кода или номинальной цены единицы измерения).
2. Нормы точности измерения (погрешности средств измерения, динамические характеристики, чувствительность, стабильность и вариация показаний и т.д.).
3. Виды, способы, выражения и методы нормирования погрешностей.
4. Методы аттестации и испытаний.

Под номинальной статической характеристикой средства измерения понимается функциональная зависимость выходного сигнала (перемещение отсчетного устройства и т.п.) от измеряемого параметра  $A$  (выходного сигнала) при заданных внешних условиях и в установившемся состоянии системы. Статическая характеристика будет линейной лишь в случае постоянства дифференциальной чувствительности  $S$  для всего рабочего диапазона значений  $A$ , когда

$$S = \frac{dN}{dA} = \frac{df(A)}{dA} = \text{const} . \quad (2.3)$$

Минимальное значение  $X_0$  измеряемой величины, которое способно вызвать наименьшее заметное перемещение указателя или изменение выходной величины, называется *порогом чувствительности*.

Под постоянной прибора понимается число единиц измерения, на которое надо умножить отсчет (число, определяемое положением отсчетного устройства) для получения показания в определенных единицах измерения. В большинстве измерительных приборов отсчетные устройства выполнены в виде шкалы и указателя. Шкала представляет собой совокупность отметок, расположенных вдоль какой-либо линии. Начало и конец шкалы, соответствующие нижнему и верхнему пределам измерения, определяют диапазон измерения. Инерционность средств измерений в процессе перехода параметра от одного установившегося значения к другому оценивается динамическими характеристиками, такими, как постоянная времени, время установления показаний и т.п. Важными характеристиками измерительных устройств являются погрешности. *Погрешностью измерительного* устройства называется разность между результатом измерения  $X$  некоторой величины и ее действительным значением  $X_0$ :

$$\Delta = X - X_0, \quad (2.4)$$

где  $\Delta$  – есть основная количественная характеристика измерения, называемая *абсолютной погрешностью*. *Относительная погрешность*, равная отношению абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выражается в процентах:

$$\delta = \frac{100}{X_0} \quad (2.5)$$

или с учетом  $\Delta$  и  $X$ :

$$\delta = \frac{100\Delta}{X_0} = \frac{100}{X - \Delta} = \frac{100\Delta}{X\left(1 - \frac{\Delta}{X}\right)} \approx \frac{100\Delta}{X}. \quad (2.6)$$

При вычислении относительной погрешности абсолютную погрешность можно относить непосредственно к показанию прибора.

Погрешности измерительных устройств могут быть порождены несовершенством конструкции, условиями технологического процесса изготовления, а также условиями его эксплуатации. В связи с этим погрешности измерительных устройств могут быть классифицированы так:

статические и динамические, в зависимости от условий и режимов эксплуатации;

систематические, случайные и грубые, в зависимости от характера их проявления и возможностей устранения.

*Статической погрешностью* называется погрешность, возникающая при установившемся значении измеряемой величины и неизменных внешних условиях.

*Динамической погрешностью* называется погрешность, возникающая при изменении измеряемой величины и внешних воздействий.

*Систематическими погрешностями* называются постоянные по величине и знаку или изменяющиеся по определенному закону погрешности, повторяющиеся при многократных измерениях. Систематические погрешности определяются путем многократных измерений одной и той же величины при постоянных прочих условиях и устраняются посредством регулировочных устройств или введением коррекции с помощью специальных элементов. Систематические погрешности подразделяют на прогрессирующие и периодические. *Прогрессирующими* называются непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся погрешности от износа деталей, контактов и т.п. *Периодическими* называются погрешности, изменяющиеся по величине и знаку, возникающие при функционировании измерительных устройств.

*Случайные погрешности* представляют собой погрешности, неопределенным образом изменяющиеся по величине и знаку. Они определяют точность измерительного устройства. По случайным погрешностям производится оценка точности как самих измерительных устройств, так и методов измерения. Вследствие случайной погрешности истинное значение измеряемой величины неизвестно, поэтому при подсчете случайных погрешностей за измеренное значение принимают среднее арифметическое  $\bar{X}$  из полученных  $N$  измерений  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , т.е.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i n_{x_i}}{N}, \quad (2.7)$$

где  $n_{x_i}$  – частота появлений значений  $x_i$ ;  $N$  – число измерений.

Случайные погрешности являются случайными величинами и так же, как последние, могут быть охарактеризованы с помощью понятий и характеристик теории вероятностей.

Среднее арифметическое является наиболее достоверным значением измеряемой величины:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i. \quad (2.8)$$

При  $N \rightarrow \infty$  эта величина определяет математическое ожидание случайной величины. При большом числе независимых причин, вызывающих появление случайных погрешностей, плотность распределения выражается законом Гаусса (нормальное распределение (рис. 2.1)):

$$\omega(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(X - \bar{X})^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.9)$$

где  $\omega(X)$  – плотность распределения вероятности;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение.

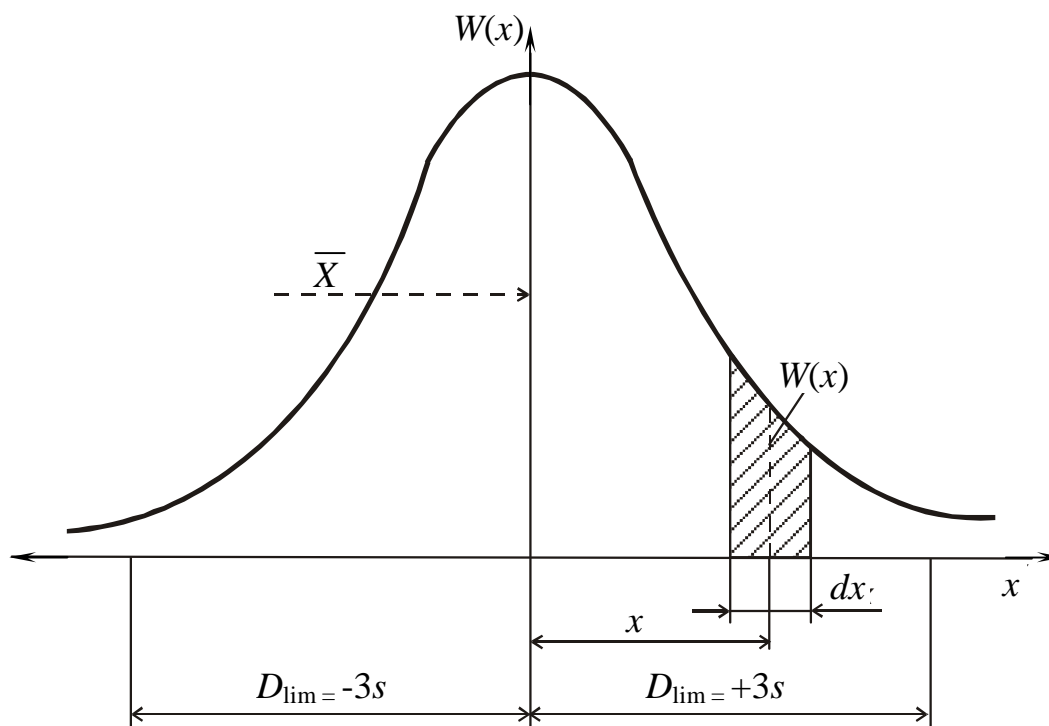


Рис. 2.1. Случайная погрешность с нормальным законом распределения:  
 $X$  – измеряемая величина;  $W(x)$  – плотность распределения

Случайную погрешность принято оценивать либо средним квадратичным отклонением, либо вероятным значением  $E$ , либо предельным  $\Delta_{\text{lim}}$ . Средняя квадратичная погрешность отдельных измерений определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}}. \quad (2.10)$$

Средняя квадратичная погрешность является основной и исходной при подсчете других. Так, предельная погрешность определяется по формуле

$$\Delta_{\text{lim}} = \pm 3\sigma, \quad (2.11)$$

вероятная (средняя) погрешность – по формуле

$$E = 0,674\sigma.$$

На рис. 2.2 схематически показаны систематические и случайные погрешности. Первые определяются по величине среднего арифметического для данной точки, а вторые – через среднее квадратичное отклонение.

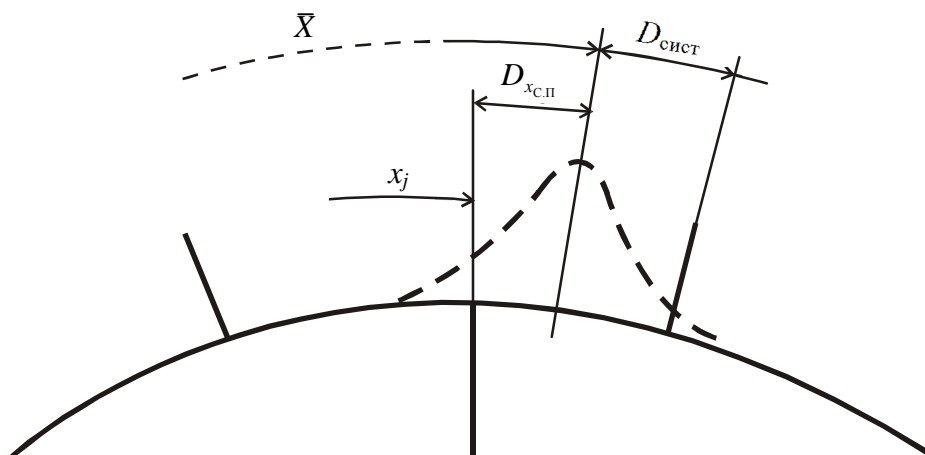


Рис. 2.2. Систематические и случайные погрешности

*Грубые погрешности* представляют собой погрешности, превосходящие предельное ( $\pm 3\sigma$ ) значение случайной погрешности. Они происходят от резких изменений внешних условий измерения. Обобщенной метрологической характеристикой средств измерения является класс точности, определяемый, как правило, граничными значениями, допускаемыми ГОСТом основной приведенной погрешности. По приведенной допускаемой основной погрешности измерительные приборы делят на классы точности 0,01 – 4,0. Промышленные приборы в большинстве случаев выпускают с классом точности 0,5; 1,5.

### 2.3. Информационная характеристика процесса измерения

Всякое измерение можно рассматривать как цепь преобразований измеряемой величины до тех пор, пока результат измерений не будет представлен в том виде, который требовалось получить.

Процесс измерения характеризуется передачей информации о значении измеряемой величины от одного носителя ее к другому, т.е. преобразованием информации о значении измеряемой величины в результат измерений. Это означает, что в информационном аспекте измерение можно

рассматривать как процесс приема и преобразования информации от измеряемой величины в целях получения количественного результата путем сравнения с принятой шкалой или единицей измерения в форме, наиболее удобной для дальнейшего использования ее человеком и машиной. Для установления связи между точностью измерений и количеством получаемой при измерениях информации используют основные положения теории информации. При этом под термином "информация" понимают совокупность сведений о каком-либо объекте, процессе или явлении, в общем случае – о физической системе. Задачей получения информации является устранение неопределенности в наших представлениях о состоянии некоторой физической системы и установление количественных закономерностей, связанных с получением, обработкой и хранением информации. Рассмотрим характеристику процесса измерения с позиций теории информации. В теории информации получению абсолютной и относительной приведенной погрешностей придается вероятностный, статистический смысл, а итог проведенного измерения рассматривается как сокращение области неопределенности измеряемой величины. Предел измерения от  $X_1$  до  $X_2$  (рис. 2.3) с позиций теории информации означает, что вероятность получения отсчетов где-то в пределах  $X_1$  и  $X_2$  равна единице. Если считать, что плотность вероятности распределения различных значений измеряемой величины вдоль всей шкалы прибора одинакова, то наша осведомленность о значении величины до измерения может быть представлена графиком распределения плотности вероятности  $P(x)$  вдоль шкалы (см. рис. 2.3). Плотность распределения вероятности в этом случае равна:

$$P(x) = \frac{1}{X_2 - X_1}. \quad (2.12)$$

Как показано на рис. 2.3, в результате измерения получено показание прибора  $X_n$ . Однако, учитывая погрешности измерения, мы принимаем результат  $X_n \pm \Delta$ . Это значит, что действительное значение измеряемой величины лежит где-то в пределах от  $X_n - \Delta$  до  $X_n + \Delta$ , т.е. в пределах участка  $2\Delta$ . Согласно теории информации, результат измерения можно характеризовать так: если до измерения область неопределенности находилась от  $X_1$  до  $X_2$  и имела малую плотность вероятности, то после измерения неопределенность сократилась до  $2\Delta$  и имеет значительную плотность  $P(x) = 1/2\Delta$ . Следовательно, получение какой-либо информации об интересующей нас величине заключается в уменьшении неопределенности ее значения. Математически это положение выражается формулой

$$M = H(X) - H(x/x_n), \quad (2.13)$$

где  $M$  – количество полученной информации,



$$H(x) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \log P(x) dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{x_2 - x_1} \log \frac{1}{x_2 - x_1} dx = \log(x_2 - x_1) \quad (2.14)$$

исходная энтропия,

$$H(x/x_n) = - \int_{x_n - \Delta}^{x_n + \Delta} \frac{1}{2\Delta} \log \frac{1}{2\Delta} dx = \log 2\Delta. \quad (2.15)$$

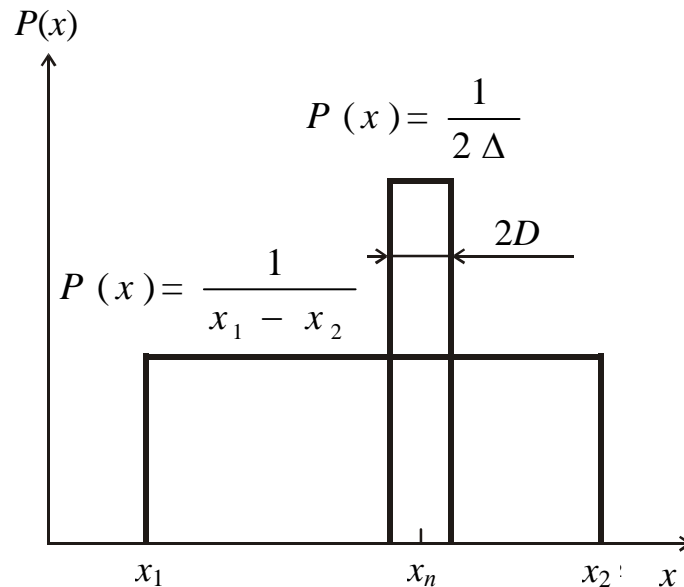


Рис. 2.3. График распределения плотности вероятности  $P(x)$  вдоль шкалы  $x$

Полученное количество информации, равное разности исходной и оставшейся энтропии, равно

$$M = H(x) - H(x/x_n) = \log(x_2 - x_1) - \log 2\Delta = \log \frac{x_2 - x_1}{2\Delta} = -\log \frac{2\Delta}{x_2 - x_1}, \quad (2.16)$$

т.е. количество информации  $M$  определяется уменьшением энтропии от значения  $H(x)$ , характеризующей неопределенность искомой величины перед измерением, до значения  $H(x/x_n)$ , которое остается после показания прибора.

Таким образом, получение любой информации, в том числе и измерительной, теория информации рассматривает как устранение некоторой неопределенности, а количество информации рассматривается как разность ситуации до и после получения данного сообщения. В настоящее время, по мнению специалистов, развивающих и использующих информационную теорию измерительных устройств, использование методов теории информации обеспечит более эффективную оценку качества приборов.

## **2.4. Надзор за измерительной техникой**

Обеспечение единства измерений и поддержания в надлежащем состоянии средств измерений во всех отраслях народного хозяйства осуществляется единой метрологической службой страны, возглавляемой Госстандартом РФ и состоящей из государственной метрологической службы и ведомственных метрологических служб. Государственная метрологическая служба имеет ряд научно-исследовательских институтов и управлений Госстандарта РФ. В ведении последних находятся территориальные центры метрологии и стандартизации, межобластные, областные (краевые) и межрайонные лаборатории государственного надзора за стандартами и измерительной техникой.

Основными задачами государственной метрологической службы являются: осуществление государственного надзора за измерительной техникой, разработка нормативно-технических документов государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) и контроль за их выполнением, создание и совершенствование эталонной базы и парка образцовых средств измерений, обеспечивающих передачу размера физических единиц от эталонов до исходных образцовых средств измерений органов ведомственных метрологических служб. ГСИ представляет собой комплекс установленных государственными стандартами правил, положений, требований и норм, определяющих организацию и методику работ по оценке и обеспечению точности измерений. Эти стандарты регламентируют: единицы физических величин, методы и средства воспроизведения этих единиц и передачи их размеров рабочим средствам измерений, способы выражения нормируемых метрологических характеристик средств измерений и показателей точности результатов измерений; требования к методике выполнения измерений; порядок и методику проведения государственных испытаний, поверки и ревизии средств измерений.

Одной из основных обязанностей государственной метрологической службы является обеспечение государственного надзора за измерительной техникой. Надзору подлежат: производство, состояние, эксплуатация и ремонт мер и измерительных приборов, а также деятельность ведомственных метрологических служб. Органы Госстандарта РФ имеют право запрещать выпуск в обращение средств измерений, не соответствующих требованиям государственных стандартов и технических условий, изымать из обращения непригодные меры и измерительные приборы, производить обязательную государственную поверку средств измерений, производить государственные испытания и аттестацию новых измерительных приборов. Все меры и измерительные приборы, предназначенные для серийного производства и выпуска в обращение, подвергаются государственным испытаниям. В процессе испытаний устанавливается соответствие приборов запросам народного хозяйства, современному уровню измерительной техники и тре-

бованиям стандартов. При положительных результатах государственных испытаний приборов Госстандарт РФ разрешает их производство и выпуск в обращение и включает в государственный реестр.

Для обеспечения необходимой точности измерений установлен определенный порядок организации и проведения поверки средств измерений. Все средства измерений подлежат государственной или ведомственной поверке.

Государственной поверке, выполняемой системой Госстандарта РФ, подвергаются средства измерения, применяемые в органах государственной метрологической службы, исходные образцовые приборы, используемые в органах ведомственных метрологических служб, а также рабочие средства измерений, применяемые для учета и взаимных расчетов, обеспечения техники безопасности охраны окружающей среды и здоровья населения. Перечень рабочих средств измерений, подлежащих обязательной государственной поверке, и периодичность этой поверки для отдельных групп приборов устанавливаются Госстандартом РФ.

Ведомственная поверка осуществляется органами ведомственных метрологических служб отдельных предприятий, организаций и учреждений, имеющих разрешение органов Госстандарта РФ на проведение поверочных работ. Этой поверке подлежат все средства измерений, используемые в народном хозяйстве, не охватываемые государственной поверкой. Поверка средств измерений проводится в соответствии с требованиями Государственных стандартов, инструкций и методических указаний Госстандарта РФ к методам и средствам поверки. Приборы, признанные в результате поверки не отвечающими своему классу точности или неисправными, не допускаются к дальнейшему применению до устранения выявленных недостатков. На приборы, признанные годными, наносятся клейма или выписываются свидетельства. При необходимости ограничить доступ к механизмам приборов. После их поверки корпуса приборов пломбируются. При участии в государственных комиссиях по приемке вновь смонтированного и реконструированного технологического оборудования взрывопожароопасных производств с наличием средств автоматики работникам пожарной охраны необходимо обращать внимание на выполнение требований соответствующих нормативных документов Госстандарта по поверке приборов и их клеймению. Это снижает возможность взрывопожароопасных ситуаций на объектах, а в случае пожара и взрыва приборы, прошедшие поверку, будут объективно отражать предаварийную ситуацию и ход развития аварии, приведшей к пожару.