

УДК 543.544

В.А. Карпенко, профессор, канд. техн. наук
Севастопольский национальный технический университет
Студгородок г. Севастополь, Украина, 99053
E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

НОВЫЙ ПОДХОД И МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ

Рассматривается новый подход и методика обоснованного выбора средств контроля с учетом трех основополагающих условий: исполнение, метрологическая обеспеченность, экономическая целесообразность.

Развитие науки и техники, повышение требований к качеству продукции и к обеспечению безопасности жизнедеятельности привели к существенному изменению требований к измерениям. Государственная самостоятельность Украины вызвала необходимость качественного укрепления метрологической службы страны и ее надзорно-управленческого органа Госстандарта. При этом возникли два необходимых условия: самостоятельность законодательной и нормативно-правовой метрологической базы и соответствие ее европейским требованиям. Госстандарт и его структурные подразделения в настоящее время усиленно работают над обновлением и созданием новых метрологических стандартов. В решении задач качественного метрологического обеспечения доминирующую роль играют принятые методы и средства контроля (измерения). При этом главная задача сводится к обеспечению единства и достоверности измерений при возможных наименьших экономических затратах в конкретных условиях. Эти условия весьма разнообразны. Основополагающее требование условий – это безопасное применение средств контроля. Из вышесказанного следуют основные требования к выбору технических средств контроля. Ими являются: исполнение средств, метрологическая обеспеченность, экономическая целесообразность применяемых средств.

В настоящее время нет единой методики научно обоснованного выбора средств контроля. Чаще всего на практике выбор средств обусловлен их наличием. В лучшем случае в качестве критерия выбора этих средств выступает точность. Такой выбор не является научно обоснованным. К сожалению, этот пробел имеет место и при подготовке молодых специалистов.

Целью данной статьи является обоснование нового подхода научно обоснованного выбора средств контроля, сопровождаемого практической методикой. В основу методики положены метрологические стандарты и нормативно-руководящие документы [1,2].

1. Условия и критерии выбора средств контроля

Исполнение средств контроля. Исполнение является одним из главных требований при выборе средств контроля. Во взрывоопасных, взрыво-пожароопасных условиях должны применяться основные и дополнительные средства контроля в соответствующем взрывозащитном, искрозащитном или взрывобезопасном исполнении. В пожароопасных условиях применяются средства контроля в нормальном (обычном) исполнении при условии выполнения соответствующих инструкций и правил пожарной безопасности. В условиях химически агрессивных сред, наличия вибраций, повышенной влажности, запыленности или других недопустимых при измерениях факторов средства контроля должны быть соответствующего т.е. виброзащищенного, пылезащищенного, влагозащищенного или другого исполнения. В нормальных условиях принимаются средства контроля в нормальном, т.е. не защищенном соответствующим образом исполнении. Средства контроля в специальном исполнении имеют маркировку на их корпусах.

Метрологическое обеспечение. Метрологическая обеспеченность определяется в основном качеством контроля, которое оценивается точностью измерения. Критерием точности является погрешность. Погрешность измерения Δ складывается из суммы неисключенной систематической Θ и случайной δ составляющих погрешностей, т.е. $\Delta = \Theta + \delta$. При выборе средств контроля должна определяться суммарная расчетная погрешность Δ_{Σ} . Кроме этого проектировщик (конструктор исследователь) обосновывает и задает предельно допустимую погрешность Δ_{lim} , которая характеризует необходимый уровень качества контроля. К решению задачи выбора средств контроля принимается условие $\Delta_{\Sigma} \leq \Delta_{\text{lim}}$. Оценка погрешностей производится в соответствии с существующими стандартами, требованиями, нормами, например, [1]. Кроме погрешностей в метрологические параметры средств контроля могут включаться диапазон измерения, чувствительность и др.

Экономическая целесообразность. Экономическая целесообразность – это соподчиненное условие первым двум основным условиям выбора средств контроля. Частным случаем экономической целесообразности является стоимость. Если имеется несколько типов средств контроля, удовлетворяющим условиям задачи по исполнению и точности, то должно приниматься средство с меньшей стоимостью. В качестве более общего критерия экономической целесообразности предлагается целевая функция

$$\Xi = p \cdot y/c \rightarrow \max,$$

где p – надежность средства контроля; y – предотвращенный ущерб в результате контроля; c – стоимость средства контроля. Оценка экономической целесообразности данного средства контроля по критерию

целевая функция – более сложная задача, и решение ее требует дополнительной подготовки

В данной методике предлагается два подхода ориентировочный выбор средств контроля и уточненный выбор. Первый применяется в менее ответственных случаях, а второй – в более ответственном контроле.

2. Ориентировочный выбор средств контроля

Данный подход покажем на примере контроля освещенности помещения искусственным светом в вечернее время при нормальных условиях безопасности.

По первому условию, исполнение средства контроля, удовлетворяют все четыре ныне применяемые люксметры: Ю-16; Ю-17; Ю-116; Ю-117.

По второму условию, метрологическую обеспеченность проводим нижеописанной последовательностью операций.

Из СНиП II-4-79 или другого нормативного документа выбирается норма освещенности $E_H = 300$ лк. В других случаях, например, в машиностроении вместо нормы могут приниматься номинальные размеры.

Затем принимается допустимое отклонение от нормируемого (номинального) значения ΔE_H . Значение этого отклонения определяется конкретными условиями измерения, применяемыми средствами, заданным требованием точности. Для большинства случаев можно принимать отклонение, равное $\frac{1}{2} - \frac{1}{4}$, т.е. 25-50% нормируемого значения

измеряемого параметра. Принимаем $\Delta E_H = \pm \frac{1}{2} E_H = 150$ лк.

Назначается предельно допустимая погрешность измерения. При ориентировочном выборе можно принимать Δ_{lim} , равную $\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\right) E_H$.

Принимаем $\Delta_{\text{lim}} = \frac{1}{2} E_H = \pm 75$ лк или относительная предельно

допустимая погрешность измерения $\delta_{\text{ИЗ.lim}} = \frac{\Delta_{\text{lim}}}{E_H \cdot 100} = \pm 25\%$. При уточненном выборе средств измерения (см. ниже) рассчитывается суммарная погрешность Δ_Σ .

Затем назначается предельно допустимая погрешность средства контроля $\delta_{\text{СП.lim}}$. Практически она составляет 25-75% от погрешности измерения. Принимаем

$$\Delta_{\text{СП.ИЗ}} = \frac{1}{2} \Delta_{\text{ИЗ.lim}} = \pm 37,5 \text{ лк или}$$

$$\delta_{\text{СП.ИЗ.lim}} = \frac{1}{2} \delta_{\text{ИЗ.lim}} = \pm 12,5\%.$$

Выбирается люксметр по метрологической характеристике, в частности, по предельно допустимой погрешности с учетом других метрологических параметров. Анализируя паспортные данные четырех люксметров, удовлетворяющих по исполнению, по погрешности также удовлетворяют все четыре, а по диапазону измерения только два: Ю-16 и Ю-116, которые и принимаются к дальнейшему анализу.

По третьему условию, экономическая целесообразность, анализ проводится по стоимости. Учитывая, что люксметр Ю-16 проще в конструктивном исполнении и соответственно имеет меньшую стоимость, чем люксметр Ю-116, окончательно принимаем люксметр Ю-16. При использовании стоимостного критерия выбора средства измерения надо критически подходить к прейскурантной цене, т.е. иметь ввиду ныне действующие договорные цены.

3. Уточненный выбор средств контроля

Уточненный выбор средств контроля производится по схеме ориентировочного выбора, приведенного выше, за исключением того, что вместо назначения предельно допустимой погрешности $\delta_{из,lim}$ рассчитывается суммарная погрешность измерения $\Sigma\delta$. Продемонстрируем этот расчет на примере измерения концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны в соответствии с ГОСТом [1].

Расчет погрешности измерения концентрации вредных веществ в воздухе производится с учетом построения градуировочных графиков. Для построения графиков используются как градуировочные растворы, так и градуировочные смеси вредных веществ с воздухом. В данном случае рассматривается пример с градуировочными растворами. Расчет с градуировочными смесями производится подобным образом в соответствии с ГОСТом [1].

Сначала рассматривается неисключенная систематическая погрешность по ее составляющим: погрешности реактивов; погрешности приготовления растворов; погрешности прибора; погрешности построения градуировочного графика; погрешности отбора проб воздуха; погрешности измерения. Затем рассчитывается случайная погрешность при повторных измерениях одной и той же величины.

Погрешность реактивов Θ_1 определяется показателями их качества и квалификацией персонала приготавливающего реактивы. При квалифицированном выполнении работы можно допустить, что $\Theta_1 \rightarrow 0$.

Погрешность взвешивания навески Θ_2 , например, 0,050 г на весах типа ВЛА-200 с погрешностью, равной 0,0001 г (цена деления шкалы по аттестату)

$$\Theta_2 = \frac{2 \cdot 0,0001}{0,05} \cdot 100 = 0,4\% .$$

Погрешность удваивается (в числителе 2), если взвешивания при измерении производятся дважды.

Погрешность измерения объема раствора в мерной колбе Θ_3 , например, вместимостью 25 мл (2-го класса) с погрешностью, равной $\pm 0,06$ мл согласно ГОСТу 1770-74

$$\Theta_3 = \frac{0,06}{25} \cdot 100 = 0,24\% .$$

Погрешность измерения объема раствора пипеткой Θ_4 , например, при измерении объема раствора 1,5 мл пипеткой вместимостью 2 мл (2-го класса) с погрешностью, равной половине цены деления $\pm 0,010$ мл

$$\Theta_4 = \frac{0,010}{1,5} \cdot 100 = 0,63\% .$$

В целом погрешность приготовления раствора рассчитывается по формуле

$$\Theta_{np.p} = \sqrt{\Theta_1^2 + \Theta_2^2 + \Theta_3^2 + \Theta_4^2} = 0,75\% .$$

Погрешность прибора $\Theta_{пр}$ определяется его классом в соответствии с документацией (паспортом). Для газоанализаторов относительная погрешность находится в пределах 2–25% [2]. Для чаще встречающихся газов и применяемых газоанализаторов погрешность составляет ± 2 -10%. Для газовых хроматографов погрешность определяется по экспериментальным данным с применением градуировочных растворов или градуировочных смесей вредных веществ с воздухом. Широкая гамма газоанализаторов для определения оксида и диоксида углерода имеет относительную погрешность от диапазона измерения равную $\pm (4-6)\%$.

Погрешность построения градуировочного графика $\Theta_{гр}$ рассчитывается по экспериментальным данным по всему интервалу концентраций. Для этого проводят 6 серий измерений по 5-10 концентрациям вредного вещества в каждой серии. Данные заносят в таблицу 1.

Таблица 1 – Данные к оценке погрешностей построения градуировочного графика

Число измерений серии	Концентрация вредного вещества в данном из градуировочных растворов C_i , мг/мл	Величина сигнала прибора, y_i	Среднее арифметическое $\bar{y}$	$\Delta y = y_i - \bar{y}$	$\Delta y_{\max}$	Концентрация, найденная по графику и соответствующая $\Delta y_{\max}$, $\Delta C_{\max}$	$\frac{\Delta C_{\max} \cdot 100}{C_i}, \%$
1	5,0	0,242	0,244	0,002	0,004	0,2	5,0

2		0,244		0,000			
3		0,246		0,002			
4		0,247		0,003			
5		0,242		0,000			
6		0,244		0,000			

За погрешность построения градуировочного графика принимается максимальное значение погрешности, в данном случае $\pm 4\%$.

Погрешность отбора проб воздуха $\Theta_{отб}$ включает в себя ряд составляющих.

Погрешность измерения объема для анализа воздуха Θ_v определяется исходя из погрешности аспирационного устройства, указанной в паспорте. Допустимая относительная приведенная погрешность пробоотборных аспирационных устройств типа ЭА составляет $\pm(6-10)\%$. Если эта погрешность неизвестна, то ее определяют по паспортной погрешности применяемого средства измерения, например, счетчика газового барабанного ГСБ-400 и др.

Погрешность измерения температуры Θ_T определяется исходя из погрешности (класса) термометра, или равным половине цены деления шкалы термометра или другого средства. Например, при погрешности термометра $\pm 0,5^\circ\text{C}$ и температуре $\pm 20^\circ\text{C}$

$$\Theta_T = \frac{0,5 \cdot 100}{273 + 20} = \pm 0,15\%.$$

Погрешность измерения атмосферного давления Θ_p , определяется погрешностью (классом) барометра или половиной цены деления шкалы. Например, при погрешности барометра $\pm 0,65$ кПа и давления 101,3 кПа

$$\Theta_p = \frac{0,065}{101,3} \cdot 100 = 0,64\%.$$

Погрешность за счет уноса или проскока измеряемого вредного вещества $\Theta_{ун}$ из поглотительных сосудов с фильтров и других устройств, определяется экспериментально путем применения дополнительных устройств. Принимаем, что применяются совершенные пробоотборные устройства и $\Theta_{ун} \rightarrow 0$.

Погрешность измерения концентраций за счет длительности хранения отобранной пробы воздуха $\Theta_{хр}$ принимаем из условия, что обработка проб происходит сразу после их отбора, а поэтому $\Theta_{хр} \rightarrow 0$.

Погрешность измерения концентраций за счет влияния сопутствующих веществ $\Theta_{сп}$, принимаем из условия чистоты отбора проб и поэтому $\Theta_{сп} \rightarrow 0$.

Общая погрешность отбора проб воздуха рассчитывается по формуле

$$\Theta_{отб} = \sqrt{\Theta_6^2 + \Theta_T^2 + \Theta_P^2 + \Theta_{ум}^2 + \Theta_{xp}^2 + \Theta_{сн}^2} = 0,6\%.$$

Погрешность измерения концентраций вредных веществ $\Theta_{изм}$ включает в себя также ряд составляющих.

Погрешность измерения объема отобранной пробы, доведенная до метки в мерной посуде измерения при помощи цилиндра и т.п. Θ_5 рассчитывается аналогично Θ_3 и численно $\Theta_5 \cong 0,9\%$.

Погрешность проведения предварительных операций по обработке отобранной пробы (фильтрование, кипячение, сжигание и т.п.) Θ_6 определяется как разность между известной и полученной концентрациями после проведения указанных операций. Принимаем, например, $\Theta_6 = 0,5\%$.

Погрешность измерения величины аналитических сигналов (оптическая плотность, высота волны и т.п.) Θ_7 . Принимаем, например, $\Theta_7 = 0,25\%$.

Общая погрешность измерения концентрации вредных веществ рассчитывается по формуле

$$\Theta_{изм} = \sqrt{\Theta_5^2 + \Theta_6^2 + \Theta_7^2} = \pm 1,6\%.$$

Суммарная неисключенная погрешность измерений при использовании градуировочных растворов определяется по формуле

$$\Theta_{рас} = \sqrt{\Theta_{пр.р}^2 + \Theta_{пр}^2 + \Theta_{ср}^2 + \Theta_{отб}^2 + \Theta_{изм}^2} = \pm 9,4\%.$$

Оценка границы суммы неисключенных систематических погрешностей измерения, производится по формуле

$$\Theta = K \sqrt{\sum_1^m \Theta_i^2} = 1,1 \sqrt{\sum_1^5 89,68} = \pm 10,42\%,$$

где Θ – неисключенные остатки систематических погрешностей: $\Theta_{пр.р}$, $\Theta_{пр}$, $\Theta_{пр.р}$, $\Theta_{отб}$, $\Theta_{изм}$; K – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью, например, при $\gamma = 95\%$, $K = 1,1$.

Оценка случайной составляющей погрешности измерения концентраций вредного вещества проводится в градуировочном растворе. Результаты наблюдений заносятся в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты наблюдений при оценке случайной погрешности измерения

Число наблюдений	Концентрация вредного вещества C_i , мкг/мл или мг/м ³	Среднее арифметическое $\bar{C}$	$\Delta C_i = C_i - \bar{C}$	$(\Delta C_i)^2$	S
1	11,15	10,74	0,41	0,1681	0,245
2	10,80		0,06	0,0036	
3	10,50		0,24	0,0576	

4	10,60		0,14	0,0196	
5	10,65		0,09	0,081	
				0,257	

По данным таблицы вычисляется среднее квадратическое отклонение наблюдений

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n C_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,250}{5-1}} = 0,245.$$

Затем вычисляется относительное среднее квадратическое отклонение результата измерения

$$S_{\bar{C}} = \frac{S \cdot 100}{\sqrt{n} \cdot \bar{C}} = \frac{0,245 \cdot 100}{\sqrt{5} \cdot 10,74} = \pm 1,01\%.$$

Значения S и $S_{\bar{C}}$ определяются в 3-5 точках по всему диапазону концентраций и выбираются для расчета максимальные значения.

Для оценки достоверности измерений необходимо знать доверительные границы результата измерения. Их находят по формуле $\epsilon = t \cdot S_{\bar{C}}$,

где t – коэффициент Стьюдента, значение которого принимается из таблиц в зависимости от доверительной вероятности P и числа результатов наблюдений. При $P = 0,95$ и $n = 5$, $t = 2,78$. Принимая $S_{\bar{C}} = 1,01$ в % или $S_{\bar{C}} = 1,01 \cdot 10,74 = 0,108$ в мкг/мл, имеем:

$$\pm \epsilon = 2,78 \cdot 0,108 = \pm 0,3 \text{ мкг/мл};$$

$$\pm \epsilon = 2,78 \cdot 1,01 = \pm 2,81 \text{ \%}.$$

Тогда действительное значение C будет находиться в доверительных границах $\bar{C} \pm \epsilon = 10,74 \pm 0,3$, т.е. $\bar{C} = 11,04$ или $\bar{C} = 10,64$ мкг/мл.

Оценка суммарной погрешности результата измерений концентраций вредных веществ определяется в зависимости от отношений Θ и $S_{\bar{C}}$. Сначала находятся отношения систематической Θ и случайной $S_{\bar{C}}$

составляющих погрешности согласно ГОСТу 8.207-76. Если $\frac{\Theta}{S_{\bar{C}}} < 0,8$, то

систематическими погрешностями пренебрегают. Если $\frac{\Theta}{S_{\bar{C}}} > 0,8$, то

пренебрегают случайными погрешностями. С учетом наших данных имеем $\frac{10,41}{1,01} = 10,3 > 0,8$, и в этом случае пренебрегаем случайными

погрешностями $S_{\bar{C}}$. Тогда суммарная рассчитанная погрешность концентраций вредных веществ в воздухе принимается равной $\Sigma\delta = \pm 10,42\%$.

Если же $8 > \frac{\Theta}{S_{\bar{C}}} > 0,8$, то граница погрешности результатов измерения

рассматривается для случайных величин по формуле $\Delta = kS_{\Sigma}$. Здесь k – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и систематической погрешностей, вычисляемый по формуле

$$k = \frac{\varepsilon + \Theta}{S_{\bar{C}} + \sqrt{\sum \frac{\Theta_i^2}{3}}} = 2,01;$$

S_{Σ} – оценка суммарного квадратического отклонения результата измерения производится по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum \frac{\Theta_i^2}{3} + S_{\bar{C}}^2} = 6,58.$$

Тогда $\Delta = 2,01 \cdot 6,58 = \pm 13,2\%$.

Далее конструктором (разработчиком) по $\Sigma\delta$ назначается предельно допустимая погрешность измерения, например, $\delta_{\text{из. lim}} = \pm 11\%$ и анализируется условие $\Sigma\delta \leq \delta_{\text{из. lim}}$. В нашем случае $10,42\% < 11\%$, т.е. принятые средства и условия измерения удовлетворяют. Если данное условие не удовлетворяется то анализируются пути снижения составляющих погрешностей и вносятся уточнения в суммарную расчетную погрешность $\Sigma\delta$ или обосновывается возможность повышения предельно допустимой погрешности. В этом случае первостепенное значение имеет опыт конструктора наличие материальной (приборной) части и нормативно-методической базы.

При наличии нескольких видов средств контроля, удовлетворяющих первому (исполнению) и второму (метрологическому обеспечению) условиям принимается допустимое средство, имеющее наименьшую стоимость.

В ы в о д ы

1. Предложенный подход и общая методика позволяют обосновать выбор средств контроля в различных отраслях инженерной деятельности с учетом лимитирующих условий: исполнения, метрологического обеспечения и стоимости средств контроля.

2. Данная методика апробируется в учебном процессе подготовки специалистов СевНТУ, в частности, по специальностям Экология и Приборостроение. Она заслуживает более широкого применения в инженерной и учебной деятельности.

3. Для широкого использования подхода научно-обоснованного выбора средств контроля необходимо наличие метрологических стандартов и других нормативных руководящих документов и уточнение предложенной методики применительно к различным отраслям деятельности.

Библиографический список

1. ГОСТ 12.1.016 – 79 (ИРС 9-1983). Воздух рабочей зоны. — М.: Госстандарт, 1984.

2. Метрологическое обеспечение безопасности труда: Справочник / Под ред. И.Х. Сологана. — М.: Госстандарт, 1989. — 256 с.

Поступила в редакцию 20.07.2002 г.