
УДК 622.412

В.Н. МЕДВЕДЕВ, *д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, зав. отд.,*
С.Ф. ТИПОЧЕНКОВ, *зав. лаб.; МакНИИ, г. Макеевка,*
В.М. ОСИПОВ, *советник ген. директора, ЗАО “ПО “Электроточприбор”,*
г. Омск, РФ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ МЕТАНА

Разработана методология определения статических характеристик термокаталитических сенсоров метана и показаны пути ее реализации. Обоснована целесообразность унификации способов питания и включения в измерительные тракты сенсоров для получения объективных данных об их основных параметрах.

Ключевые слова: шахта, безопасность, метан, термокаталитический сенсор, характеристика, испытание, оборудование.

Для решения задач обеспечения безопасности горных работ по газовому фактору в угольных шахтах широко применяется метанометрическая техника. В ее состав в качестве основных элементов входят сенсоры, преобразующие значения концентрации метана в пропорциональные электрические сигналы [1]. В шахтной метанометрии широко применяются сенсоры, работа которых основана на термокаталитическом принципе. Это относительно дешевые, малогабаритные, достаточно экономичные изделия. Однако они имеют ряд недостатков, среди которых следует отметить их низкую стабильность и высокий уровень параметрических отклонений статических характеристик [2, 3].

Характеристики термокаталитических сенсоров и методы их определения не регламентированы нормативными документами. Поэтому многие производители и потребители таких изделий проводят испытания сенсоров исходя из общих требований, предъявляемых к шахтным метанометрам [4], что порождает комплекс проблемных вопросов при оценке возможности использования сенсоров других производителей в конкретной газоаналитической технике. В этой связи возникла потребность в разработке методологии и технической базы, способных обеспечить качественность, а также повторяемость результатов.

Цель статьи – раскрытие механизма получения объективных данных о статических характеристиках термокаталитических сенсоров, предназначенных для использования в шахтной метанометрической технике.

К статическим характеристикам термокatalитических сенсоров относятся:

- номинальную функцию преобразования (коэффициент преобразования);
- основную погрешность преобразования;
- вариацию преобразования;
- диапазон преобразования;
- дополнительные погрешности преобразования, которые вызваны влиянием:

- изменения напряжения питания;
- изменения температуры окружающей среды;
- изменения влажности окружающей среды;
- изменения пространственного положения сенсора;
- специфических факторов (запыленности, присутствием кatalитических ядов, изменениями состава атмосферы и т.п.).

Под «преобразованием», в данном случае, подразумевается информационный переход от объемной доли метана к пропорциональному электрическому сигналу.

Основные статические характеристики сенсоров, за исключением некоторых дополнительных погрешностей преобразования, определяются при соблюдении следующих нормальных условий:

- температура окружающей среды 20 ± 5 °С;
- относительная влажность окружающего воздуха 30-80 %;
- атмосферное давление $(101,1 \pm 3,3)$ кПа (760 ± 25 мм. рт. ст.);
- отсутствие механических воздействий;
- исходный газ, используемый для приготовления испытательных метановоздушных смесей (МВС), должен содержать не более 1,3 % этана и 0,15 % пропана. Кроме того, в нем не должно быть примесей сероводорода, сернистого газа и других агрессивных примесей, а объемная доля углекислого газа в пересчете на 100 % метана – не более 1,0 %.

При определении перечисленных дополнительных погрешностей необходимо создание рабочих условий путем изменения напряжения питания сенсоров, температуры и влажности окружающей среды, пространственного положения, а также других факторов, оказывающих влияние на статистические характеристики термокatalитических сенсоров.

Для соблюдения указанных нормальных и рабочих условий при испытаниях сенсоров разработана специальная лабораторная установка, структурная схема которой приведена на рис. 1. Данная разработка базировалась на материалах, представленных в [5] и [6].

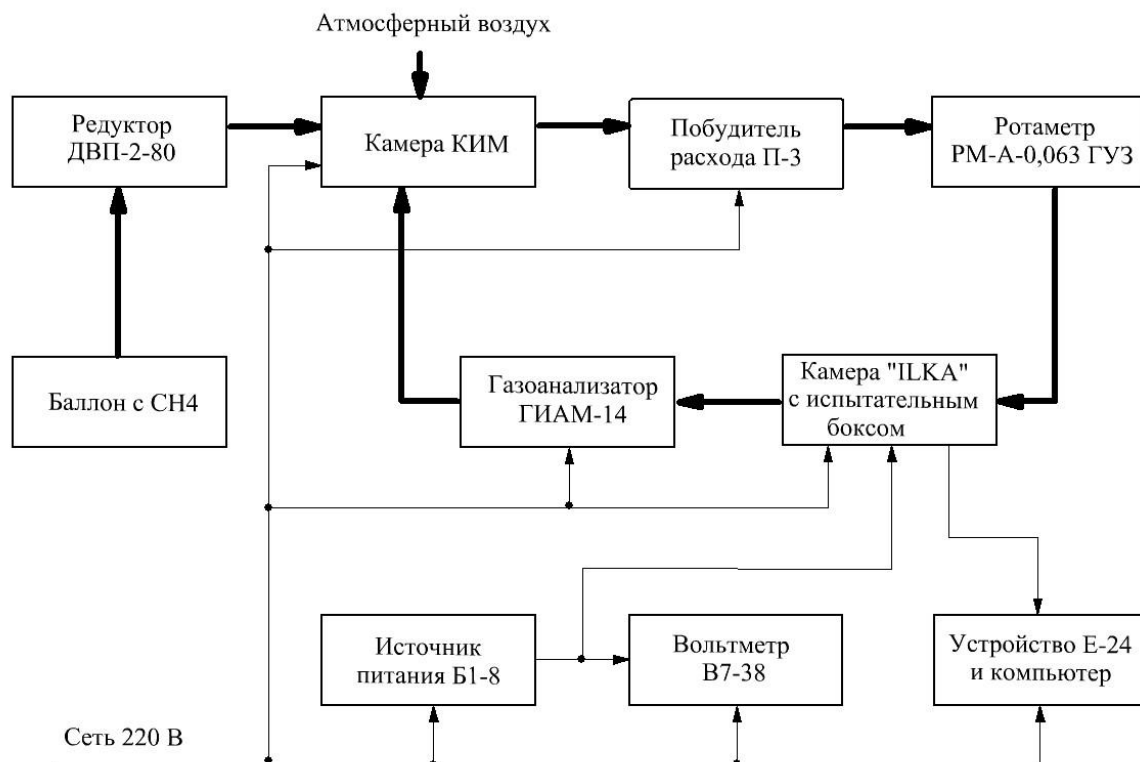


Рис. 1. Структурная схема технической реализации лабораторной установки для определения статических характеристик термокаталитических сенсоров метана: **→** газовая линия, **→** электрическая линия

В состав установки входят: баллон высокого давления, заполненный метаном; редуктор ДВП-2-80, снижающий до атмосферного уровня давление в газовой линии; камера КИМ, позволяющая на основе метана, поступающего из редуктора, и атмосферного воздуха синтезировать МВС; побудитель расхода П-3, предназначенный для прокачки МВС по газовой линии; ротаметр РМ-А-0,063 ГУЗ, обеспечивающий количественную оценку и регулировку объемного расхода газовой смеси; камера "ILKA", формирующая климатические параметры для исследуемых объектов и содержащая испытательный бокс, внутри которого установлен сенсорный модуль; газоанализатор ГИАМ-14, выполняющий роль образцового измерителя процентного содержания метана в газовой смеси; источник питания Б1-8, обеспечивающий нагрев сенсоров до заданных температурных значений; вольтметр В7-38, позволяющий определять уровень выходного напряжения источника питания; устройство Е-24, поочередно подключающее выходные цепи измерительных мостов к компьютеру, осуществляющему накопление и обработку данных о параметрах сенсоров в ходе их испытаний.

Установка позволяет создавать и стабильно поддерживать в испытательном боксе:

– заданные уровни содержания метана в диапазоне от 0 до 2,5 % об. с основной приведенной погрешностью не более $\pm 2,0$ %;

– относительную влажность МВС в диапазоне от 10 до 100 % с погрешностью не более $\pm 0,5$ %;

– температуру МВС в диапазоне от +5 до +35 °С с погрешностью не более $\pm 0,2$ °С;

– напряжение, питающее сенсоры, в диапазоне от 0 до 3 В с погрешностью не более 0,1 % и дрейфом за 8 ч работы не более 0,2 % при пульсациях напряжения не более 1,0 мВ.

Особенность установки, представленной на рис. 1, состоит в том, что имеется возможность осуществить плавное изменение объемной доли метана в смеси, воздействующей на сенсоры; длительный промежуток времени поддерживать заданный уровень концентрации метана и сохранять неизменными климатические параметры среды, окружающей сенсоры. Кроме того, установка позволяет определять и другие характеристики сенсоров, например, стабильность их работы. После внесения незначительных изменений в конструкцию, ее можно применять для испытаний метанометрической техники.

В методическом плане проведение испытаний с применением разработанной лабораторной установки осуществляется по алгоритму, близкому к изложенному в [4].

Перед определением статических характеристик сенсоры должны быть включены для прогрева в течение не менее 10 мин. в среде чистого воздуха. Затем, путем подачи на каждый сенсор объемной доли метана в пределах 1...2 %, производится измерение выходного сигнала ($U_{\text{ВЫХ}}$), снимаемого с предварительно сбалансированного неравновесного моста, и вычисляется коэффициент преобразования (K) согласно выражению:

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{C_{\text{К}}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{К}}$ – объемная доля метана, содержащаяся в газовой смеси, подаваемой на сенсор при определении коэффициента преобразования, %.

Основная погрешность преобразования сенсором процентного содержания метана в электрический сигнал (ΔC_0) определяется не менее чем в четырех точках рабочего диапазона (C_p) в последовательности, приведенной в таблице.

Таблица

Последовательность подачи МВС на сенсор при определении
основной погрешности ΔC_0

Цикл изменения объемной доли CH_4	Объемная доля CH_4 , %
Прямой	0,0-1,0-1,5-2,0
Обратный	2,0-1,5-1,0-0,0
Прямой	0,0-1,0-1,5-2,0
Обратный	2,0-1,5-1,0-0,0

Значение основной погрешности ΔC_0 вычисляется по формуле:

$$\Delta C_0 = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K} - C_p. \quad (2)$$

Из полученных значений выбирается максимальная величина, которая служит показателем нелинейности преобразования конкретного сенсора.

Вариация преобразования (ΔC_B) вычисляется на основе данных, полученных в ходе определения основной погрешности, согласно выражению:

$$\Delta C_B = \left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K} \right)_{\max} - \left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K} \right)_{\min}, \quad (3)$$

где $\left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K} \right)_{\max}$, $\left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K} \right)_{\min}$ – максимальное и минимальное значение выходного сигнала измерительного моста в объемных долях (CH_4) соответственно, %.

Диапазон преобразования устанавливается по заданным (ΔC_3) и реально полученным значениям основной погрешности, т.е. путем выбора участка выходной характеристики измерительного моста, где выполняется условие $\Delta C_3 \leq \Delta C_0$.

Дополнительные погрешности преобразования определяются отдельно для каждого влияющего фактора. Так, влияние изменения напряжения питания (ΔC_{II}) вычисляется по формуле:

$$\Delta C_{\Pi} = \left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K} \right)_y - \left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K} \right)_H, \quad (4)$$

где $\left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K} \right)_y, \left(\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K} \right)_H$ – значения выходного сигнала измерительного моста в объемных долях метана (CH_4), зафиксированные при увеличении (уменьшении) напряжения питания моста на 10 % и при номинальном его уровне соответственно, %.

Аналогичным образом определяются дополнительные погрешности преобразования от влияния изменения температуры, влажности окружающей среды, пространственного положения сенсора и специфических факторов, изменяющих выходной сигнал измерительного моста.

Питание измерительных мостов при определении статических характеристик терموкаталитических сенсоров метана осуществляется стабилизированным напряжением, т.е. $U_{\Pi} = \text{const}$ (рис. 1). Такой способ питания выбран после детального рассмотрения принципов работы неравновесных мостов и обусловлен следующим.

Известно, что в измерительные тракты метанометров, содержащих неравновесные мосты, могут быть включены тепловые преобразовательные элементы (ТПЭ) терموкаталитических сенсоров метана в соответствии со схемами, представленными на рис. 2.

Применительно к схемам рис. 2, в [7] приведены выражения, с помощью которых можно определить $U_{\text{ВЫХ}}$ для случаев стабилизированного напряжения ($U_{\Pi} = \text{const}$) и тока ($I_{\Pi} = \text{const}$) питания неравновесного моста с дифференциальными преобразователями:

$$U_{\text{ВЫХ1}} = \frac{1}{2} U_{\Pi} \varepsilon \frac{1}{1 + \frac{R_0}{R_H} (1 - \varepsilon^2/2)}, \quad (5)$$

$$U_{\text{ВЫХ2}} = \frac{1}{2} U_{\Pi} \varepsilon \frac{1}{(1 - \varepsilon^2/4) + \frac{R_0}{R_H} (1 - \varepsilon^2/2)}, \quad (6)$$

$$U_{\text{ВЫХ3}} = \frac{1}{2} I_{\text{П}} \varepsilon R_0 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_0}{R_{\text{Н}}}\right) \left(\frac{R_0}{R_{\text{Н}}}\right) (1 - \varepsilon^2/4)}, \quad (7)$$

$$U_{\text{ВЫХ4}} = \frac{1}{2} I_{\text{П}} \varepsilon \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{Н}}} + \frac{1}{R_0}}, \quad (8)$$

где $U_{\text{ВЫХ1}}$, $U_{\text{ВЫХ2}}$ – выходные напряжения измерительных мостов для схем рис. 2 а и рис. 2 б соответственно при $U_{\text{П}} = \text{const}$, В;

$U_{\text{ВЫХ3}}$, $U_{\text{ВЫХ4}}$ – выходные напряжения измерительных мостов для схем рис. 2а и рис.2б соответственно при $I_{\text{П}} = \text{const}$, В;

ε – относительная чувствительность сенсора;

R_0 – суммарное сопротивление рабочего и компенсационного элементов сенсора в рабочем состоянии при отсутствии метана и нормальных условиях эксплуатации, Ом;

$R_{\text{Н}}$ – входное сопротивление вольтметра, Ом.

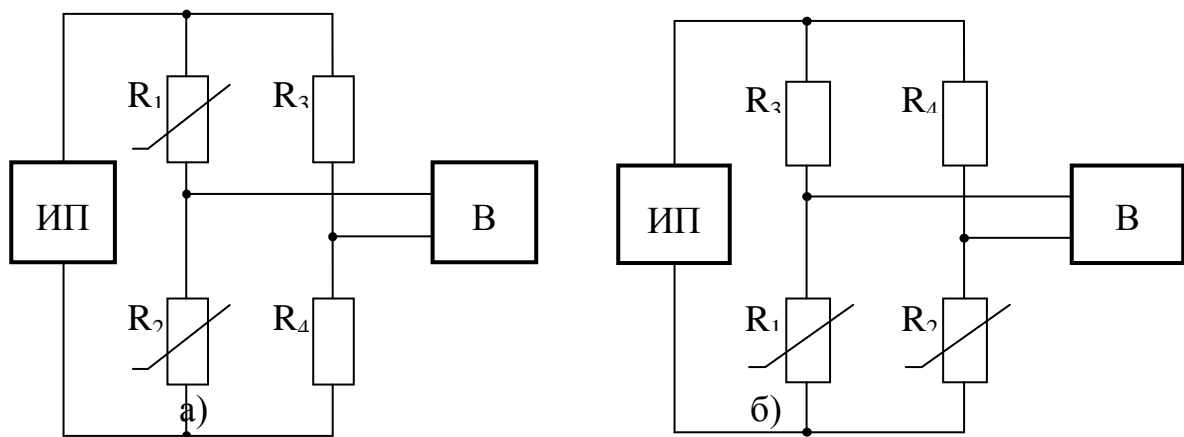


Рис. 2. Измерительные тракты метанометров с последовательным включением ТПЭ (а) и с включением ТПЭ в параллельные ветви (б): R_1 и R_2 – рабочий и компенсационный ТПЭ соответственно; R_3 и R_4 – резисторы измерительного моста; ИП – источник питания; В – вольтметр.

Изучение зависимостей (5) - (8) позволило выявить, что способы включения ТПЭ сенсоров, а также способы их питания оказывают влияние

на выходное напряжение, снимаемое с измерительной диагонали неравновесного моста. Следовательно, при определении статических характеристик сенсоров необходимо использовать унифицированные способы получения объективно сопоставимых результатов испытаний. В этом качестве вполне приемлемо применение последовательного включения ТПЭ при $U_n = \text{const}$, которое широко распространено в практике аналитического приборостроения и закономерно нашло отражение в разработанной лабораторной установке.

Обобщая изложенное можно заключить, что в настоящее время имеется реальная возможность осуществлять оценку терموкаталитических сенсоров метана различных производителей с позиции степени идентичности статических характеристик.

ВЫВОДЫ

1. При определении статических характеристик терموкаталитических сенсоров метана следует использовать метрологически обеспеченное специальное оборудование в виде предложенной лабораторной установки, позволяющей создавать в ее испытательной камере газовые смеси с заданным уровнем содержания метана и поддерживать регламентированные климатические параметры.

2. На результаты определения статических характеристик терموкаталитических сенсоров метана оказывают влияние не только внешние факторы (температура и влажность окружающей среды, погрешности измерительных приборов и т.п.), но также способы включения и питания таких сенсоров.

3. Для получения объективных данных о статических характеристиках терموкаталитических сенсоров метана, необходимо стандартизировать процесс получения информации о выходных сигналах неравновесных мостов, в которых работают эти сенсоры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербань А. Н. Методы и средства контроля рудничного газа (метана) / А.Н. Щербань, Н.И. Фурман. – Киев: Наукова думка, 1965. – 411 с.

2. Карпов Е. Ф. Физико-технические основы автоматической защиты от выделений метана / Е. Ф. Карпов. – М.: Наука, 1981. – 185 с.

3. Карпов Е. Ф. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы / Е. Ф. Карпов, И. Э. Биренберг, Б. И. Басовский. – М.: Недра, 1984. – 285 с.

4. Приборы шахтные газоаналитические. Общие технические требо-

вания. Методы испытаний: ДСТУ ГОСТ 24032:2009 (СТ СЭВ 6455:88). – [Введен в действие 2009–02–01]. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 36 с.

5. Медведев В. Н. Математическая модель формирования выходных сигналов термокаталитических датчиков метана / В. Н. Медведев // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка-Донбасс, 2006. – Вып. 18. – С. 121-129.

6. Приборы электрические для обнаружения и измерения горючих газов. Общие требования и методы испытаний: ГОСТ МЭК 61779.1:2006. – [Введен в действие 2015–02–15]. – М.: Стандартиформ, 2013. – 45 с.

7. Электрические измерения неэлектрических величин / [Турчин А. М., Новицкий, Левшина Е. С. и др.]; под ред. В. П. Новицкого. – Л.: Энергия, 1975. – В. П. 576 с.

8. Назаренко В. И. Исследование и разработка способов улучшения эксплуатационно-технических характеристик шахтных приборов контроля метана: автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 05. 198 “Автоматизация производственных процессов в горной промышленности” / В. И. Назаренко. – Киев, 1972. – 27 с.

Получено: 21.07.17

DETERMINATION OF STATIC PARAMETERS OF METHANE THERMOCATALYTIC SENSORS

The approach for determination of static parameters of methane thermocatalytic sensors has been developed and the ways for its implementation have been showed. The reasonability of unification of sensor power supply and their connection to measuring chains for receiving of objective data concerning their basic parameters has been validated.

Keywords: mine, safety, methane, thermocatalytic sensor, characteristic, test, equipment.