

УДК 622.412:622.817

В. Н. МЕДВЕДЕВ, к.т.н., зав. отд.

С. Ф. ТИПОЧЕНКОВ, мл. науч. сотрудник

В. А. БЕБИНОВ, инженер, МакНИИ, г. Макеевка

ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИХ И ТЕРМОКОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ ШАХТНЫХ МЕТАНОМЕТРОВ

Обоснована целесообразность исследований термокаталитических и термокондуктометрических сенсоров метана путем моделирования их исходных характеристик. Синтезирована виртуальная модель сенсоров и описан метод оценки ее соответствия изделиям, применяемым в шахтных метанометрах.

Ключевые слова: виртуальная модель, метанометр, сенсор, метан.

Для непрерывного автоматического контроля содержания метана в угольных шахтах нашли широкое применение газоанализаторы, в которых в качестве первичных измерительных преобразователей используются термокаталитические и термокондуктометрические сенсоры [1, 2]. Такие сенсоры, несмотря на определенные их недостатки, сохраняют свою приоритетность и в перспективе, на что указывает передовой отечественный и мировой опыт развития аналитического приборостроения. Это позволяет считать актуальными исследования в направлении дальнейшего совершенствования указанных сенсоров.

Анализ последних достижений и публикаций показывает, что несмотря на значительные успехи в создании термокаталитических и термокондуктометрических сенсоров, многие их параметры остаются недостаточно изученными, в первую очередь, в силу специфики экспериментальных исследований с применением метано-воздушных смесей. Так, при определении ряда параметров сенсоров приходится сталкиваться с взрывоопасными концентрациями, что может привести к негативным последствиям в плане безопасности проводимых экспериментов [3]. Кроме того, в лабораторных условиях сложно реализовать процессы изменения концентрации метана, которые реально могут протекать в условиях шахт. Поэтому необходимо перейти при исследованиях сенсоров от метано-воздушных смесей к другим формам

входных воздействий, которые могут иметь удобный для повторения вид, включая математические зависимости, описывающие процессы метановыделения в горных выработках.

Цель статьи заключается в раскрытии результатов работы по созданию специальной модели терموкаталитических и термокондуктометрических сенсоров метана, которая позволяет проводить эксперименты по установлению их реакции на входные воздействия без применения метано-воздушных смесей.

При создании метанометров разработчикам приходится часто сталкиваться с недостатком информации об эффективности функционирования сенсоров при преобразовании процентного содержания метана в пропорциональные электрические сигналы. В то же время недостаточность сведений хотя бы об одном из параметров сенсора может привести к неопределенности интерпретации результатов измерений и единственным способом устранения такой неопределенности является подробное изучение его свойств. Наиболее наглядно и оперативно это можно выполнить с использованием компьютерного моделирования.

На современном этапе развития компьютерной техники ценность виртуального моделирования определяется, в первую очередь тем, что оно наилучшим образом позволяет осмыслить связь между физической сущностью и математическим описанием процесса. Такое моделирование можно представить в виде проведения определенного рода опытов близких как к экспериментальным, так и к теоретическим исследованиям.

Для получения достоверных результатов нужно связать создаваемую модель с физической сущностью процессов, протекающих в исследуемых сенсорах, предварительно введя исходные данные, определяющие их параметры. Следует особо отметить, что термокаталитические и термокондуктометрические сенсоры являются заведомо нелинейными системами, требующими взвешенного подхода при их рассмотрении.

В основу модели были положены ранее полученные и опубликованные в МакНИИ результаты, которые позволяют аналитически описать статические и динамические характеристики сенсоров. Так, согласно [4], нормированные значения выходных сигналов термокаталитических сенсоров могут находиться в поле, ограниченном кривыми

φ_1 и φ_2 :

$$\varphi_1 = 1,06 \cdot e^{-0,5C_k} \cdot \sin\left(\pi \cdot C_k^{\frac{1}{3}}\right), \quad (1)$$

$$\varphi_2 = 1,3 \cdot e^{-2,1C_k} \cdot \sin\left(2\pi \cdot C_k^{\frac{2}{3}}\right), \quad (2)$$

где $C_k = \frac{C_m}{C_{\max}}$ – нормированное по максимальному уровню ($C_{\max} = 100\% \text{ об. CH}_4$) текущее значение объемной доли метана (C_m).

Из [5] следует, что переходной процесс термokatалитического сенсора определяется процессом диффузионного газообмена терморекционной камеры и тепловым процессом окисления метана на чувствительном элементе. При этом передаточная функция сенсора имеет вид

$$W_c(p) = \frac{k_c}{(T_r p + 1) \cdot (T_z p + 1)} \quad (3)$$

где k_c – коэффициент передачи сенсора, определяемый выражением

$$k_c = \frac{A \cdot k_{\text{пр}}}{(1 + A\rho)},$$

A – окисляющая способность чувствительного элемента;

$k_{\text{пр}}$ – коэффициент преобразования чувствительного элемента, зависящий от его параметров, режима работы и измерительной схемы;

$\rho = \frac{L}{DS}$ – сопротивление диффузионному газообмену терморекционной камеры;

L, S – соответственно длина и сечение входного канала камеры;

D – коэффициент диффузии метана в воздухе;

T_r – постоянная времени переходного процесса газообмена сенсора, определяемая выражением

$$T_r = \frac{V\rho}{(1 + A\rho)},$$

V – объем терморекционной камеры;

T_z – постоянная времени теплового переходного процесса газообмена сенсора, зависящая от параметров чувствительного элемента и режима работы сенсора.

В [6] показано, что выходной сигнал термокондуктометрического сенсора, включенного в мостовую измерительную схему, определяется из выражения

$$U_{\text{вых}} = k \frac{\lambda_{\text{см}} - \lambda_{\text{в}}}{\lambda_{\text{см}} \cdot \lambda_{\text{в}}}, \quad (4)$$

где k – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров сенсора и чувствительного элемента, электрических характеристик чувствительного элемента и величины тока питания;

$\lambda_{\text{в}}, \lambda_{\text{см}}$ – теплопроводность воздуха и анализируемой смеси при температуре, определяемой по формуле

$$t_{\text{см}} = \frac{t_{\text{н}} + t_{\text{ст}}}{2},$$

где $t_{\text{н}}$ – температура нити сенсора;

$t_{\text{ст}}$ – температура стенок камеры.

На основе выражений (1) – (4) на базе компьютерной техники была синтезирована, с использованием программы Multisim-7 от компании Electronics Workbench, универсальная модель термокаталитических и термокондуктометрических сенсоров метана, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

Модель включает в себя следующие элементы:

- источник входного сигнала (V), имитирующий процессы изменения концентрации метана, протекающие в местах установки сенсоров;

- инерционное звено первого порядка (R13C1) с регулируемой величиной постоянной времени от 0 до 1 с для формирования виртуального газообмена термореакционной камеры;

- повторитель напряжения (U5), позволяющий исключить взаимное влияние R13C1 и R14C2;

- инерционное звено первого порядка (R14C2) с регулируемой величиной постоянной времени от 0 до 1,5 с для формирования виртуальных свойств теплочувствительных элементов сенсоров;

- повторитель напряжения (U6), позволяющий исключить влияние на цепь R14C2 со стороны усилителя U1 и нагрузки, подключаемой к выходу 1;

- логарифмический усилитель (U1) с регулируемым при помощи резистора R3 коэффициентом передачи для формирования нелинейных свойств сенсоров;

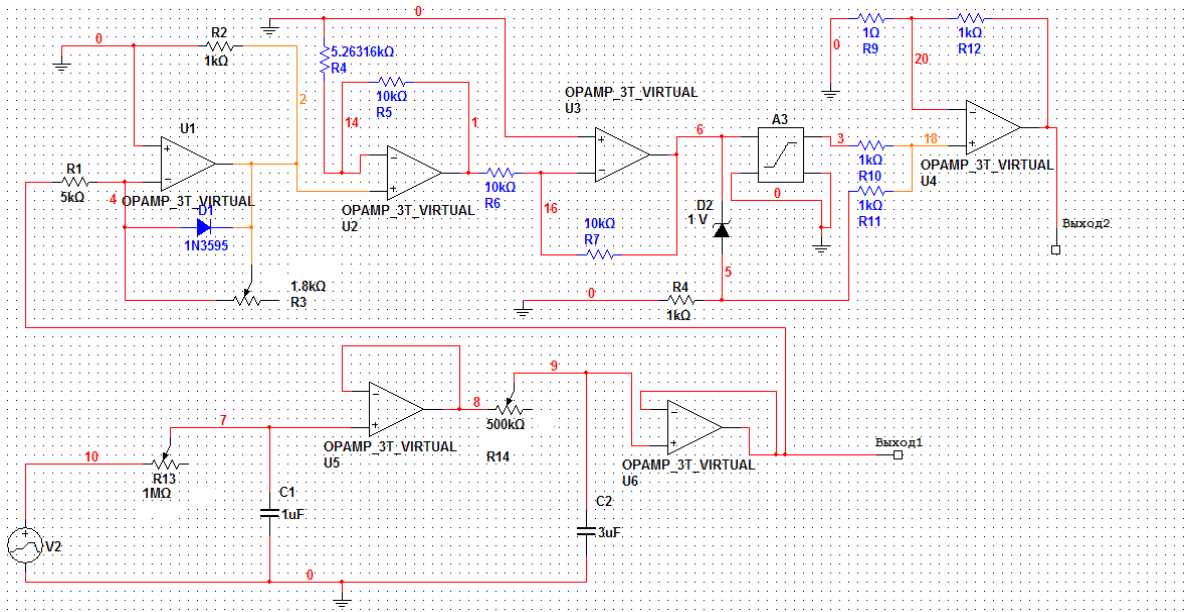


Рис. 1. Принципиальная схема универсальной модели термокаталитических и термокондуктометрических сенсоров метана

- масштабирующий (U2) и инвертирующий (U3) усилители для создания определенных уровней сигналов заданной полярности;
- ограничитель напряжения (A3) и инвертирующий сумматор (U2) для реализации спадающих участков термokatалитических сенсоров при превышении стехиометрических значений концентрации метана.

В модели использованы так называемые «идеальные» операционные усилители, обладающие следующими свойствами:

- бесконечно большим дифференциальным коэффициентом усиления по напряжению;
- отсутствием напряжения смещения нуля, т.е. при равенстве входных напряжений выходное напряжение равно нулю независимо от синфазного входного напряжения;
- нулевыми входными токами по обоим входам;
- нулевым выходным сопротивлением;
- коэффициентом усиления синфазного сигнала равным нулю;
- мгновенным откликом на изменение входных сигналов.

Для оценки соответствия модели реальным свойствам сенсоров метана^а на ее вход было подано от источника входного сигнала (V) линейно изменяющееся напряжение, которое достигло своего максимума (соответствующего 100 % об. CH₄) за 20 с. Затем это напряжение линейно снижено до нулевого уровня за 100 с., т.е. сформировано на входе модели линейно нарастающее воздействие со скоростью 5 В/с и спадающее – 1В/с, что отвечает интенсивным процессам, рассмотренным в [7]. Указанный процесс представлен на рис. 2 в виде графика.

Линейно изменяющееся воздействие вызвало отклик модели на выходе 1 в виде графика 2 на рис. 2. Его рассмотрение позволило идентифицировать данный график с реакцией термокондуктометрического сенсора, динамические свойства которого описываются дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными времени $T_1=1$ с и $T_2=1,5$ с. Причем, нелинейные свойства статической характеристики сенсора в данном случае не учитывались. При необходимости их учета следует переключить выход 1 на инвертирующий усилитель U3, а нелинейные свойства сенсора сформировать с помощью резистора R3.

Воздействие (1) приводит также к отклику на выходе 2. На рис. 2 он представлен в виде графика 3. Его анализ позволил констатировать, что он соответствует реакции термокаталитического сенсора на данный вид воздействия при постоянных времени T_1 и T_2 , аналогичных величинам рассмотренного выше термокондуктометрического сенсора.

Концентрация метана (% об.) или пропорциональный сигнал сенсора (единицы)

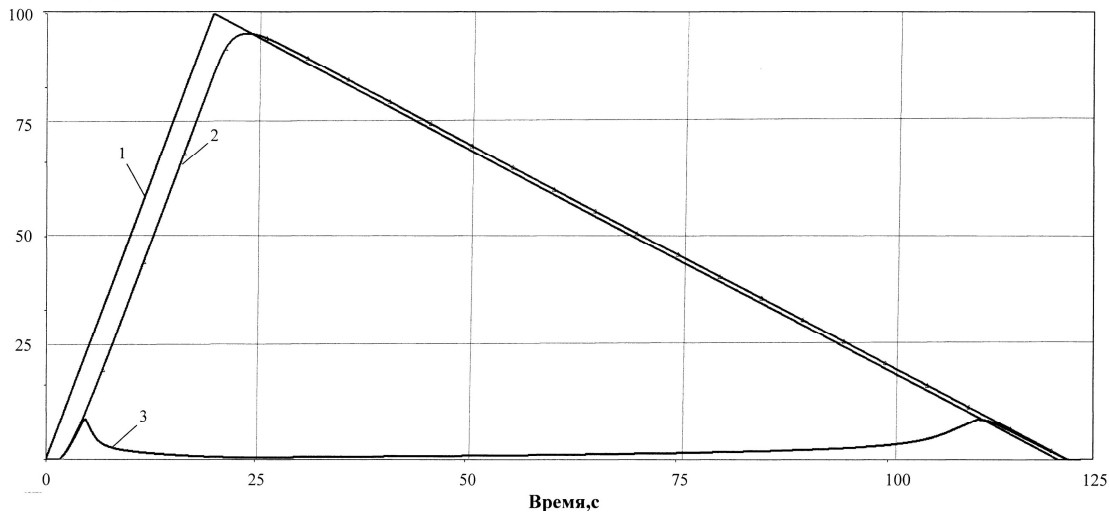


Рис. 2. Графики процесса изменения концентрации метана (1) и откликов модели на выходе 1 (2) и выходе 2 (3) при $R_{13} = 1,0$ МОм, $C_1 = 1,0$ Мкф, $R_{14} = 500$ кОм, $C_2 = 3,0$ Мкф

Таким образом, разработанная модель реально создает условия для проведения исследований на всех этапах проектирования газоанализаторов. С ее помощью можно оценить реакции термokatалитических и термокондуктометрических сенсоров на любые воздействия, представленные в виде аналоговых сигналов или в виде математических зависимостей.

ВЫВОДЫ

1. На основе результатов ранее проведенных исследований первичных измерительных преобразователей синтезирована виртуальная модель термokatалитических и термокондуктометрических сенсоров метана.
2. С помощью тестового линейно изменяющегося воздействия установлена адекватность созданной модели статическим и динамическим характеристикам, применяемым на практике сенсорам метана.
3. Виртуальная модель сенсоров метана может найти применение при разработке газоаналитической техники на этапах ее проектирования и испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов Е. Ф. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы / Карпов Е. Ф., Биренберг И. Э., Басовский Б. И. – М.: Недра, 1984. – 285 с.
2. Капелюшников Г. И. Приборы и защитные средства по технике безопасности: справочник / Капелюшников Г. И., Колосюк В.П., Боброва Л.С. – М.: Недра, 1991. – 255 с.
3. Приборы шахтные газоаналитические. Общие технические требования. Методы испытаний: ДСТУ ГОСТ 24032:80 (СТ СЭВ 6455:88) – [Введен с 2009 -01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 36 с.
4. Медведев В. Н. Математическая модель формирования выходных сигналов термokatалитических датчиков метана / В. Н. Медведев // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, – 2006. – Вып. 18. – С. 121-129.

5. Назаренко В. И. Компенсация статической и динамической погрешностей термокаталитического датчика метана / В. И. Назаренко, Е. И. Новиков, В. К. Анпилогов // Улучшение охраны труда и техники безопасности на предприятиях и стройках угольной промышленности / сб. науч. тр. / МакНИИ – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1978. – Вып. 2. – С. 78 – 84.
6. Фрундин В. Е. Исследование термокондуктометрического датчика метана в диапазоне концентраций 0-100 об. % / В. Е. Фрундин, Г. А. Мирошник, В. В. Исаев, [и др.] // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах / Сб. науч. тр. / МакНИИ – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 1987. – С.184 – 191.
7. Брюханов О. М. Розвиток теорії і вдосконалення практики попередження та локалізації вибухів у глибоких шахтах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.26.01 «Охорона праці» / О. М. Брюханов / НГУ – Дніпропетровськ: 2007. – 36 с.

Получено: 24.06.09

Обґрунтована доцільність досліджень термокаталітичних і термокондуктометричних сенсорів метану шляхом моделювання їх початкових характеристик. Синтезована віртуальна модель сенсорів і описано метод оцінки її відповідності виробам, які застосовують в шахтних метанометрах.

Expidence is substantiated for investigations of thermocatalytic and thermoconductometric methane sensors by simulating their initial characteristics. A virtual model of the sensors is synthesized, and a method is described for assessing its conformity with items used in mine methane meters.