

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА НА ВЫХОДЕ ШАХТНОГО СТВОЛА

Нестеренко В.Н., магистрант; Косарев Н.П., доц., к.т.н., доц.

(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР)

В Донбассе возможный уровень добычи шахтного метана оценивается в (6–7) млрд. м³ в год. Территориально месторождения шахтного метана находятся вблизи потенциальных потребителей тепловой и электрической энергии, что увеличивает перспективность его использования, в частности в децентрализованной энергетике. Метан, содержащийся в вентиляционной смеси работающей шахты, имеет концентрацию до 1^{об.}%. В полученной в процессе подземной дегазации метановоздушной смеси его концентрация достигает на некоторых шахтах 60^{об.}%, но обычно находится в пределах (25–30)^{об.}%. При закрытии шахты из нарушенного горного массива и оставшихся целиков в шахтное пространство продолжает выделяться метан, который постепенно вытесняет из него воздух, при этом в шахте создается газоздушная смесь с концентрацией метана в среднем 50^{об.}% при отсутствии его откачки [1].

На данный момент известен усовершенствованный способ получения метана из метановоздушной смеси на выходе шахтного ствола [2]. Смысл способа заключается в том, что метановоздушную смесь сжимают, пропускают через водный раствор гидрохинона при давлении не менее 3 МПа и температуре не выше +2°C, где отделяют воздух с образованием клатратов метана с гидрохиноном, которые затем направляют в нагреватель для разделения их на метан и водный раствор гидрохинона, который после охлаждения повторно используют в цикле. При этом объем водного раствора гидрохинона и его концентрацию устанавливают исходя из предполагаемых объемов прокачиваемой метановоздушной смеси и концентрации в ней метана, подлежащего утилизации.

Таким образом, актуальной задачей является измерение концентрации метана в метановоздушной смеси для улучшения его отделения.

Поскольку процесс выделения метана из метановоздушной смеси производится с определенным периодом, то высокое быстродействие прибора для измерения концентрации метана в данном случае не требуется. На основании проведенного анализа методов измерения установлено, что наиболее оптимальным вариантом для измерения концентрации метана в диапазоне от 0 до 5^{об.}% (наиболее реальный диапазон концентраций метана в условиях работающей шахты) будет термokatалитический метод.

В качестве основы для канала измерения концентрации метана выбирается датчик ТХМ-2,8 [3]. Поскольку принцип работы термokatалитического датчика основан на изменении сопротивления чувствительного элемента при наличии в анализируемой среде метана, то для измерения изменения сопротивления датчика его целесообразно включить в мостовую схему (М), питающуюся от постоянного источника (ИП). Величина выходного напряжения моста составляет десятки-сотни мВ, что требует его усиления для приведения к уровню входного напряжения цифровой части прибора. Для этих целей используется измерительный усилитель (ИУ), представляющий собой устройство с дифференциальным входом. Для подавления помех от работы промышленного оборудования на выходе измерительного канала используем фильтр нижних частот (ФНЧ), частота среза которого должна быть в несколько раз меньше промышленной частоты.

Таким образом, структурная схема канала измерения концентрации метана на основе термokatалитического датчика ТХМ-2,8 имеет вид, приведенный на рисунке 1.

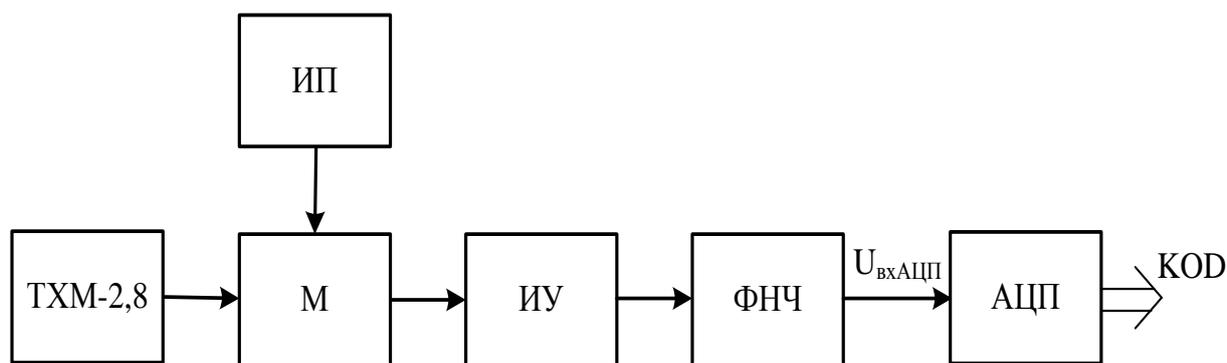


Рисунок 1 – Структурная схема канала измерения концентрации метана

Используя обобщенный принцип работы термокаталитического датчика и технические характеристики конкретного датчика ТХМ-2,8 была установлена зависимость концентрации метана (C) от температуры на термопреобразовательном элементе (ТПЭ) датчика – активный элемент. Данная зависимость носит линейный характер и может быть описана выражением:

$$t_{ТПЭ} = t_{нач} + S \cdot C = 360 + 24 \cdot C, \quad (1)$$

где $t_{нач}$ – минимальная температура для начала окисления метана, $^{\circ}\text{C}$;

S – чувствительность ТПЭ, $^{\circ}\text{C}/\%.$

Получаем, что при изменении концентрации метана от 0 до 5 $\%.$ температура ТПЭ изменяется от 360°C до 480°C .

Изменение температуры воспринимается платиновой спиралью, сопротивление которой описывается следующим выражением:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \beta \cdot t), \quad (2)$$

где R_0 – сопротивление платиновой спирали при температуре 0°C ;

β – температурный коэффициент сопротивления платины, $\beta = 3.9 \cdot 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$.

Используя технические характеристики датчика ТХМ-2,8 определено, что при концентрации метана $C = 0 \%$ сопротивление ТПЭ датчика составляет 14 Ом. Поскольку платиновая спираль при отсутствии метана нагревается до температуры 360°C , то сопротивление платиновой спирали при температуре 0°C из выражения (2) будет равно: $R_0 = 5,824 \text{ Ом}$.

Подставив в выражение (2) выражение (1), получим зависимость сопротивления платиновой спирали от концентрации метана:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \beta \cdot (t_{нач} + S \cdot C)) = 14 + 0,545 \cdot C. \quad (3)$$

Получаем, что при изменении концентрации метана от 0 до 5 $\%.$ сопротивление активного элемента для выбранного датчика ТХМ-2,8 изменяется в пределах от 14 Ом до 16,725 Ом по линейному закону.

При последовательном включении активного и пассивного элементов датчика зависимость выходного напряжения моста от концентрации метана описывается выражением:

$$U_{\text{вых}_M} = U_{\text{пит}} \cdot \left(K_{\theta} - \frac{R_0 \cdot (1 + \beta \cdot (t_{нач} + S \cdot C_{\text{ма}}))}{R_0 \cdot (1 + \beta \cdot (t_{нач} + S \cdot C_{\text{ма}})) + R_{\text{п}}} \right) = 2,8 \cdot \left(0,5 - \frac{14 + 0,545 \cdot C}{28 + 0,545 \cdot C} \right), \quad (4)$$

где K_{θ} – коэффициент деления резистивной ветви моста.

График зависимости выходного напряжения моста от концентрации метана представлен на рисунке 2.

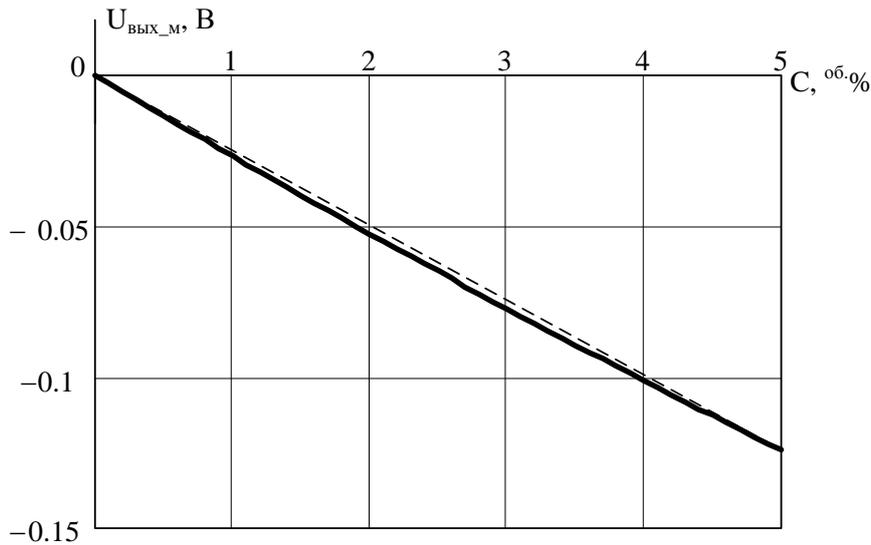


Рисунок 2 – Зависимость выходного напряжения моста от концентрации метана

Из рисунка 2 следует, что выходное напряжение измерительного моста изменяется в диапазоне от 0 до -0.1242 В при изменении концентрации метана от 0 до 5 об.%. При этом зависимость носит нелинейный характер.

Для приведения выходного напряжения моста ко входному формату АЦП измерительный усилитель должен обладать коэффициентом усиления равным:

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{5 - 0}{0,1242 - 0} = 40.27.$$

Тогда зависимость выходного напряжения измерительного усилителя от концентрации метана имеет вид:

$$U_{\text{ВЫХИУ}} = K_U \cdot U_{\text{ПИТ}} \cdot \left(K_{\partial} - \frac{R_0 \cdot (1 + \beta \cdot (t_{\text{нач}} + S \cdot C_{\text{ма}}))}{R_0 \cdot (1 + \beta \cdot (t_{\text{нач}} + S \cdot C_{\text{ма}})) + R_{\Pi}} \right) = 112,8 \cdot \left(0,5 - \frac{14 + 0,545 \cdot C}{28 + 0,545 \cdot C} \right). \quad (5)$$

Фильтр не должен влиять на форму выходного сигнала измерительного канала. Поскольку время установления выходного сигнала датчика составляет в районе 8 с, частоту среза целесообразно взять равной 10 Гц. Для того, чтобы помехи с частотами кратными промышленной частоте не проходили на выход канала, используем фильтр второго порядка, передаточная функция которого описывается выражением [4]:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = - \frac{K_{U\text{-}\phi} \cdot \omega_0^2}{p^2 + \alpha \cdot \omega_0 \cdot p + \omega_0^2}. \quad (6)$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$ – частота среза;

$K_{U\text{-}\phi}$ – коэффициент передачи фильтра в полосе пропускания.

Таким образом, зависимость выходного напряжения измерительного канала от концентрации метана описывается выражением:

$$U_{\text{ВХАЦП}} = \frac{K_{U\text{-}\phi} \cdot \omega_0^2}{(j\omega)^2 + \alpha \cdot \omega_0 \cdot j\omega + \omega_0^2} \cdot K_U \cdot U_{\text{ПИТ}} \cdot \left(K_{\partial} - \frac{R_0 \cdot (1 + \beta \cdot (t_{\text{нач}} + S \cdot C_{\text{ма}}))}{R_0 \cdot (1 + \beta \cdot (t_{\text{нач}} + S \cdot C_{\text{ма}})) + R_{\Pi}} \right). \quad (7)$$

Выходной сигнал измерительного канала поступает на вход АЦП, где он преобразуется в двоичный код, взаимосвязь между которыми носит линейный характер. Тогда при использовании десятиразрядного АЦП зависимость десятичного эквивалента кода от концентрации метана имеет вид, представленный на рисунке 3.

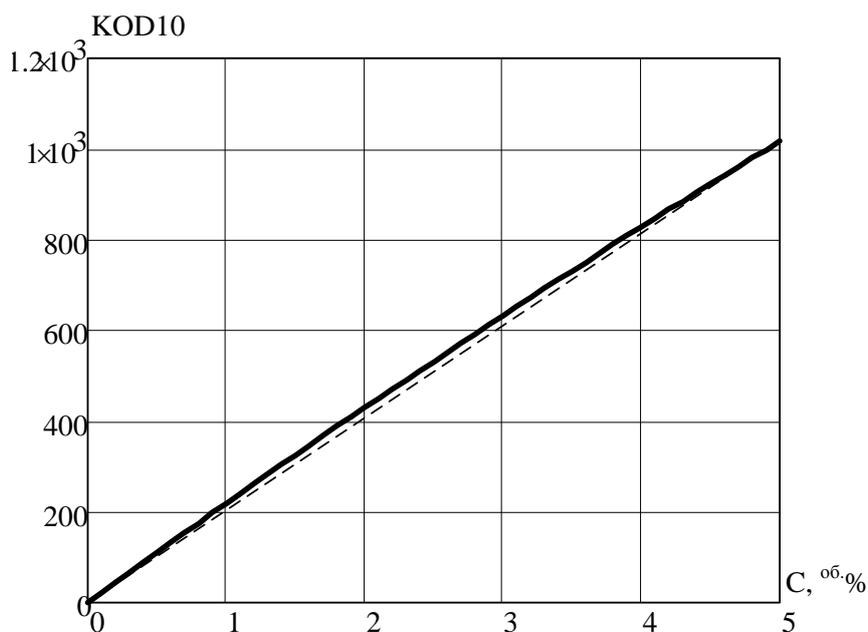


Рисунок 3 – Зависимость десятичного эквивалента выходного кода АЦП от концентрации метана

Таким образом, на основании полученного двоичного кода с выхода АЦП в цифровой части прибора может быть однозначно определена концентрация метана. Поскольку полученная на рисунке 3 зависимость носит нелинейный характер, то при использовании в цифровой части прибора линейной номинальной градуировочной характеристики методическая погрешность определения концентрации метана стремится к инструментальной погрешности датчика, которая составляет 0,2^{об.%}. Для того, чтобы методической погрешностью определения концентрации метана можно было пренебречь и упростить работу цифровой части прибора необходимо номинальную градуировочную характеристику представить в виде полиномиальной зависимости.

В результате проведенных исследований установлено, что для полинома оптимальной является вторая степень. Таким образом, в качестве номинальной градуировочной характеристики для определения концентрации метана целесообразно использовать полином второй степени вида:

$$C(KOD10) = 4.44 \cdot 10^{-7} \cdot KOD10^2 + 4.43 \cdot 10^{-3} \cdot KOD10 + 1.592 \cdot 10^{-5}. \quad (6)$$

Методическая погрешность полинома при этом составляет $2.6 \cdot 10^{-3}$ об.%, что в 80 раз меньше инструментальной погрешности измерительного канала и ее влиянием на результат определения концентрации метана можно пренебречь.

Перечень ссылок

1. Бондаренко, В. И. Энергетика: история, настоящее и будущее. Т. 1: От огня и воды к электричеству / В. И. Бондаренко и др. – Киев, 2005. – 304 с.
2. Пат. 2302401 РФ, МПК С07С9/04, Е21F7/00. Способ получения метана из матановоздушной смеси и устройство для его осуществления / С. А. Толстунов, С. П. Мозер, А. С. Толстунов (Ru). – заявл. 22.05.2006; опубл. 10.07.2007.
3. ЧНПП «Укрсенсор» : Термокаталитический датчик шахтного метана ТХМ-2,8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ukrsensor.com/p66998336-termokataliticheskij-datchik-shahtnogo.html> – Дата доступа : март 2018. – Загл. с экрана.
4. Изъюрова, Г. И. Расчет электронных схем. Примеры и задачи / Г. И. Изъюрова, Г. В. Королев, В. А. Терехов. – Москва : Высшая школа, 1987. – 335 с.