

УДК 622.412.13:681.5.08

Е.Н. Новиков (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова
E-mail: en1313@i.ua,

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА МЕТАНА

Выполнен анализ переходных процессов в измерительной цепи терموкаталитического датчика метана. Рассмотрены режимы влияющие на постоянную времени тепловых переходных процессов и способы её уменьшения.

Ключевые слова: чувствительные элементы, термокаталитический контроль метана, переходные процессы, математическая модель.

Общая постановка проблемы

Как известно, инерционность термокаталитического преобразователя определяется переходным процессом газообмена терморреакционной камеры и переходными процессами изменения температуры каталитического и сравнительного чувствительных элементов (ЧЭ).

Причем, этому вопросу посвящено много работ [1–4]. Однако авторы этих работ, рассматривают переходный процесс газообмена камеры, не учитывая влияния на него реакции окисления метана на каталитическом ЧЭ, а тепловые переходные процессы ЧЭ рассматриваются только при граничных режимах работы датчика метана (ДМ), а именно:

- при стабилизации тока ЧЭ;
- стабилизации напряжения на каталитическом ЧЭ;
- стабилизации напряжения на мостовой измерительной схеме;
- стабилизации температуры ЧЭ.

Термокаталитический датчик можно разбить на два последовательно соединенные звена: реакционную камеру и измерительно-питающую схему. Такое разбиение правомочно, поскольку процессы газообмена и теплообмена идут последовательно. Вначале в реакционную камеру поступает метан который достигнув поверхности чувствительного элемента (ЧЭ), метан окисляется. При этом выделяется дополнительное тепло, которое воздействует на тот же терморезистор, в результате чего его сопротивление изменяется и в измерительной схеме появляется выходной сигнал.

В различных работах исследование процесса теплообмена ЧЭ термокаталитического датчика метана осуществлялась главным образом при режиме $I_n = \text{const}$ (I_n — начальный ток через ЧЭ) [1,3] или $U_n = \text{const}$ (U_n — начальное напряжение на ЧЭ) [1,2]. При этом опускаются промежуточные режимы. Поэтому потребовалось получить математическую модель термокаталитического датчика для различных режимов работы ЧЭ.

Постановка задач исследования

Для исследования динамических процессов в измерительной схеме термокаталитического датчика метана необходимо решить следующие задачи:

1) Получить математическое описание выходных сигналов измерительной схемы термокаталитического датчика метана при различных режимах работы ЧЭ и проанализировать результаты;

2) На основе модели определить рациональные режимы работы ЧЭ, и возможность их реализации путем введения в схему питания ЧЭ регулятора.

Решение задач и результаты исследований

При разнообразии подходов к исследованию тепловых переходных процессов трудно сравнить результаты исследований и выбрать более оптимальный режим работы и измерения.

Для наглядного графического представления возможных режимов работы ЧЭ ДМ приведена на рис. 1 вольтамперные характеристики (ВАХ) снятые с помощью управляемого авторегулятора сопротивления [1]. На этом рисунке кривая **ОАВ** соответствует ВАХ ЧЭ, снятой при отсутствии метана. С увеличением содержания метана ветви ВАХ снятые при различных содержания метана от точки **А**, соответствующей температуре начала реакции окисления метана, опускаются ниже и располагаются в рабочей области практически параллельно нулевой ВАХ. При поддержании режима стабилизации тока на ЧЭ ($I_n = \text{const}$) рабочая точка перемещается по линии **ВС**.

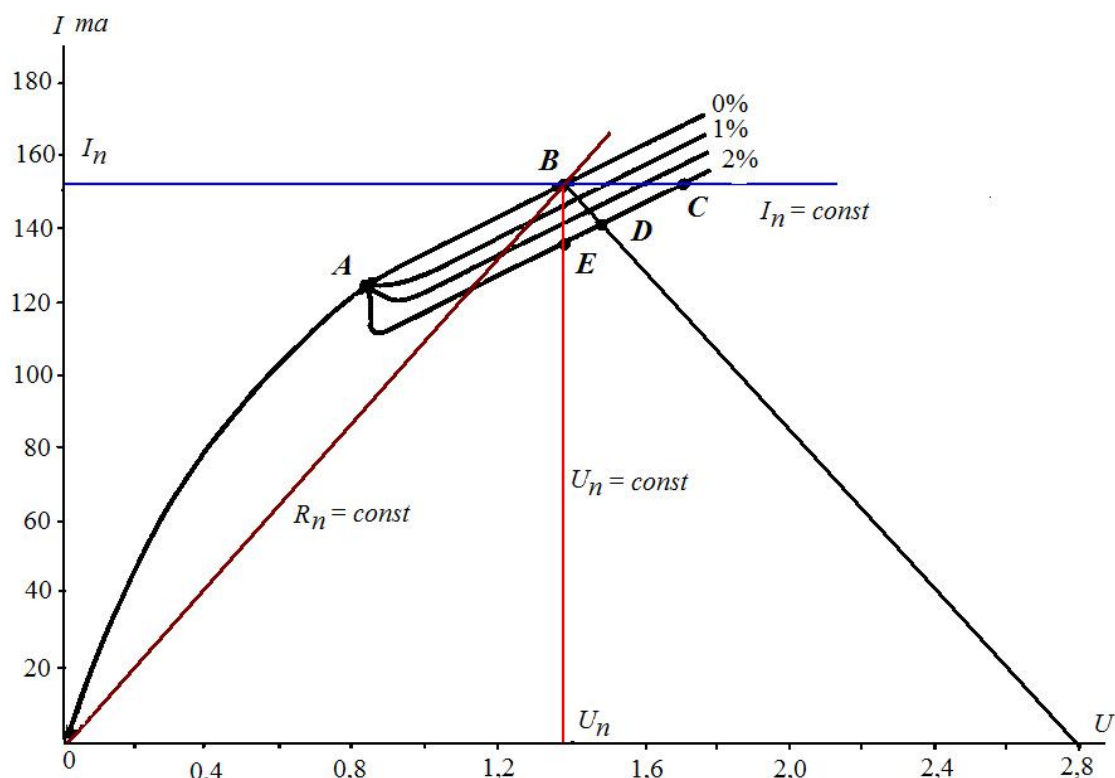


Рисунок 1 — Вольтамперные характеристики чувствительного элемента термокаталитического датчика метана с возможными областями работы

Если обеспечивается режим стабилизации напряжения на ЧЭ ($U_n = \text{const}$) рабочая точка перемещается по линии **ВЕ**. При поддержании постоянства сопротивления (температуры) ЧЭ рабочая точка перемещается по линии **ВО**

На основании закона сохранения энергии дифференциальное уравнение теплового баланса ЧЭ, подключенного к источнику электрической энергии, имеет следующий вид

$$C \frac{d\Theta_{\text{ЧЭ}}}{dt} = I^2 R_{\text{ЧЭ}} - \varepsilon(\Theta_{\text{ЧЭ}} - \Theta_{\text{ср}}) + gn_{\text{ЧЭ}} \quad (1)$$

- где: C — теплопроводность ЧЭ, Дж/град;
 $\Theta_{\text{ЧЭ}}$ — температура ЧЭ, град;
 ε — теплопередача ЧЭ, Вт/град;
 I — ток, протекающий через ЧЭ, А;
 $R_{\text{ЧЭ}}$ — сопротивление ЧЭ, Ом;
 $\Theta_{\text{ср}}$ — температура среды, град;

g — количество тепла, выделяемого в единицу времени на ЧЭ;
 $N_{чэ}$ — концентрация метана у ЧЭ, об% .

Зависимость сопротивления ЧЭ можно записать зависимостью

$$r_{чэ} = r_0 (1 + \alpha \theta_{чэ})$$

где : r_0 — сопротивление ЧЭ при $\theta_{чэ} = 0^0$ С, Ом;

α — температурный коэффициент сопротивления, град⁻¹.

Подставив значение $r_{чэ}$ в (1) получим

$$\frac{C}{\alpha R_0} \frac{dR_{чэ}}{dt} = I^2 R_{чэ} - \frac{\varepsilon}{\alpha R_0} (R_{чэ} - R_{ср}) + gn_{чэ} \quad (2)$$

Как отмечалось выше, это уравнение решалось для граничных режимов работы. Чтобы решить это уравнение для возможных режимов воспользуемся универсальной схемой позволяющей эти режимы исследовать (рис 2). Приведенная схема позволяет обеспечить любой режим работы при установке U_{ab1} .

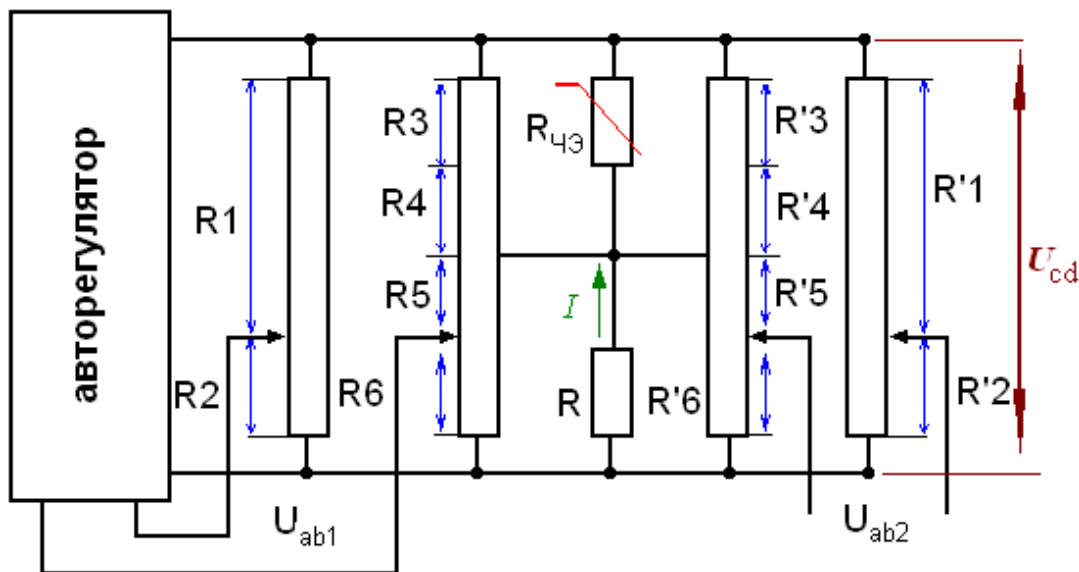


Рисунок 2 — Универсальная схема для различных режимов работы ЧЭ

В этой схеме выходной сигнал U_{ab2} . Для компенсации влияния на выходной сигнал не измеряемых параметров среды применяется аналогичная схема в которую включен сравнительный ЧЭ. При этом о концентрации метана судят по разности выходных напряжения этих схем.

Для данной схемы

$$U_{ab1} = U_{cd} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - I \left(R_{чэ} \frac{R_3}{R_3 - R_4} + R \frac{R_5}{R_5 + R_6} \right)$$

Из этого выражения

$$I = \frac{U_{ab1} n_1}{R_{чэ} + R m_1} \quad (3)$$

где:

$$n_1 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 - R_4} \right)^{-1} \quad m_1 = n_1 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_5}{R_5 + R_6} \right) \quad (4)$$

Аналогично выражению (3) запишем такое же выражение для измерительной части моста

$$I = \frac{U_{ab2} n_2}{R_{чэ} + R m_2} \quad (5)$$

где:

$$n_2 = \left(\frac{R'_1}{R'_1 + R'_2} - \frac{R'_3}{R'_3 - R'_4} \right)^{-1} \quad m_2 = n_2 \left(\frac{R'_1}{R'_1 + R'_2} - \frac{R'_5}{R'_5 + R'_6} \right).$$

Из выражений (2.3) и (2.5)

$$R_{чэ} = R \frac{U_{ab2} n_2 m_1 - U_{ab1} n_1 m_2}{U_{ab1} n_1 - U_{ab2} n_2} \quad (6)$$

Подставив (2.6) в (2.3) получим

$$I = \frac{1}{R} \frac{U_{ab1} n_1 - U_{ab2} n_2}{m_1 - m_2} \quad (7)$$

Подставим в (2.6) и (2.7)

$$U_{ab2} = U_{ab20} - U_{вых}$$

где: U_{ab20} — значение напряжения в измерительной диагонали при концентрации метана $n=0$ об%.

$U_{вых}$ — выходной сигнал измерительной схемы.

После подстановки получим

$$R_{чэ} = R \frac{U_{ab20} n_2 m_1 - U_{ab1} n_1 m_2 - U_{вых} n_2 m_1}{U_{ab1} n_1 - U_{ab20} n_2 - U_{вых} n_2} \quad (8)$$

$$I = \frac{1}{R} \frac{U_{ab1} n_1 - (U_{ab20} - U_{вых}) n_2}{m_1 - m_2} \quad (9)$$

Если подставить (2.8) и (2.9) в (2.2), получим дифференциальное уравнение четвертой степени, которое практически не решается в аналитическом виде. Чтобы решить это уравнение разложим в ряд выражение (2.8).

Подставив в (2.2) I из выражения (9), $R_{чэ}$ при I^2 из (8), после соответствующих преобразований получим:

$$-D \frac{dU_{вых}}{dt} = -U_{вых}^2 L + U_{вых} N + \frac{ca}{(m_1 + m_2)^2} - M(R_p - R_{cp} - BU_{вых}) + qn_{гэ} \quad (10)$$

где $d = \frac{c}{\alpha R_o} B$, $M = \frac{E}{\alpha R_o}$, $L = \frac{1}{R} \times \frac{n_2 b}{(m_1 - m_2)^2}$, $N = \frac{1}{R} \times \frac{an_2 - cb}{(m_1 - m_2)^2}$

Запишем (2.13) для начальных условий $t = 0$, $u_{вых} = 0$, $n_{гэ} = 0$.

$$\frac{ca}{(m_1 - m_2)^2} - M(R_n - R_6) = 0 \quad (11)$$

Вычтя (11) из (10), получим

$$-D \frac{dU_{вых}}{dt} = -LU_{вых}^2 (N + MB) U_{вых} + qn_{гэ}$$

После разделения переменных, интегрирования и соответствующих преобразований получим

$$U_{вых} = nK_T \left(1 - e^{-\frac{t}{T_T}} \right) \quad (12)$$

где: K_T — коэффициент передачи ДМ;

$$T_T = \frac{C}{\varepsilon + \alpha R_o J_H^2 \frac{R_H - R_p}{R_H + R_p}} \quad (13)$$

— постоянная времени переходного процесса теплообмена ДМ

R_H — сопротивление ЧЭ при номинальном режиме;

R_p — эквивалентное сопротивление режима работы ЧЭ.

Из рис. 2 следует, что при $U_{ab1} = u_r$ $n_1 = \infty$. Это соответствует наиболее известному и исследованному режиму работы $I = \text{const}$.

При этом из (12) и (13) получим известные выражения

$$T_\theta = \frac{C}{E - \alpha R_o I_n^2} \tag{14}$$

$$K_\theta = \frac{-q \alpha R_o I_n^{\frac{1}{m^2}}}{E - \alpha R_o I_n^2} \tag{15}$$

Что подтверждает правильность приведенных математических выкладок.

Полученные в этой работе выражения (12–13) дают возможность проводить анализ и выбирать наиболее целесообразные для конкретных приборов режимы работы и измерения. Они позволили впервые получить выражения для T_θ и K_θ для всех граничных режимов работы, из которых наибольший интерес представляет последний (с поддержанием постоянства сопротивления ЧЭ), поскольку при этом $T_\theta = 0$ и K_θ не зависит от e , которая зависит от многих факторов (температуры, влажности и т.д.). Это очень важно для построения образцового средства, т. к. Компенсации T_θ с помощью корректирующих звеньев неизбежна динамическая погрешность, связанная с разбросом постоянных времени корректора и тепловой постоянной ДМ.

Произведем экспериментальную проверку выражения для определения K_θ для этого режима.

Для этого воспользуемся вольтамперной характеристикой ЧЭ преобразователя прибора СМС, приведенная на рис. 1.

Для начальной точки $U_H = 1,4$ В и $I_H = 0,152$ А и $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹; $R_o = 3,07$ Ом;

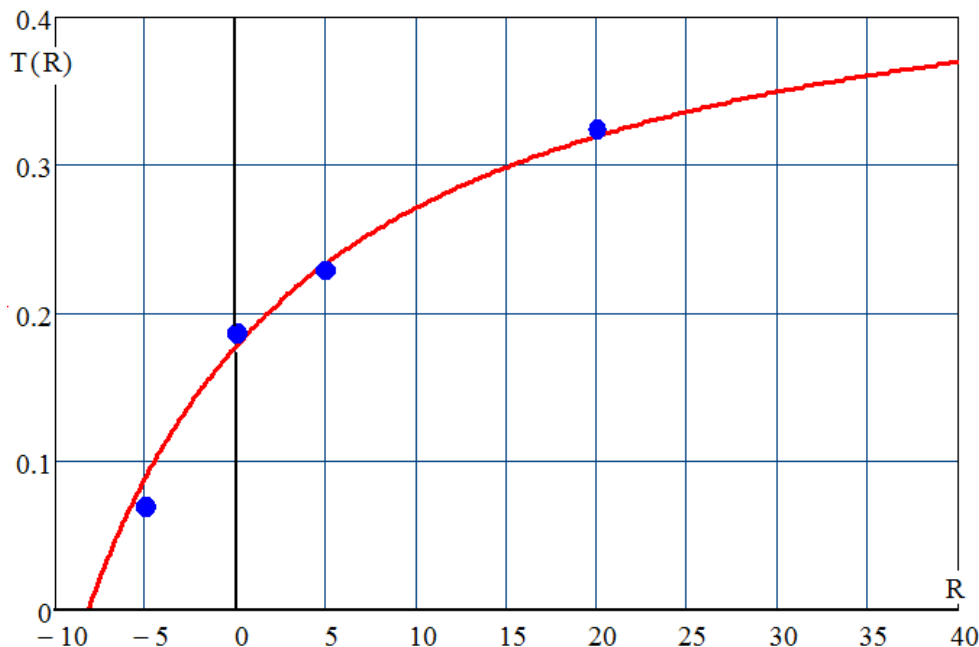


Рисунок 3 — Зависимость постоянной времени теплообмена ДМ от R_p — эквивалентного сопротивления режима работы ЧЭ. Точками обозначены экспериментальные данные

Полученные результаты экспериментов с ЧЭ подтвердили правильность полученной математической зависимости (12), которая позволяет определить постоянную времени теплообмена ДМ при различных режимах работы ЧЭ.

Выводы

1. Получена математическая модель зависимости постоянной времени теплообмена ДМ от R_p — эквивалентного сопротивления режима работы ЧЭ.
2. Проведенное моделирование показывает соответствие математической зависимости постоянной времени теплообмена ДМ с экспериментальными данными.
3. Для снижения постоянной времени теплообмена требуется применение режима с поддержанием постоянной температуры ЧЭ.

Список использованной литературы

1. Назаренко В.И. Исследование и разработка способов улучшения эксплуатационно-технических характеристик шахтных приборов контроля метана: автореф. дис. канд. техн. наук / В.И. Назаренко. — К.: КПИ, 1972. — 27 с.
2. Суржко А.Е. Разработка и исследование быстродействующего автоматического анализатора метана в рудничной атмосфере: автореф. дис. канд. техн. наук / А.Е. Суржко. — К.: КПИ, 1974. — 28 с.
3. Щербань А.Н. Методы и средства контроля рудничного газа / А.Н. Щербань, Н.И. Фурман. — К.: Наукова думка, 1965. — 412 с.
4. Карпов Е.Ф. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы / Е.Ф. Карпов, И.Э. Биренберг, Б.И. Басовский. — М.: Недра, 1984. — 285 с.
5. Новиков Е.Н. Исследование процессов тепло- и газообмена в термокаталитическом датчике метана / Е.Н. Новиков // В сб. научных трудов. — МакНИИ, 1979 — 8 с.
6. Новіков Є.М. Автостабілізація вихідного сигналу термокаталітичного датчика метану / Є.М. Новіков // Известия Донецкого горного института. — 2001. — №2.

Надійшла до редакції:
30.01.2012р.

Рецензент:
д-р техн. наук, проф.
Ковалев Е.Б.

E.N. Novikov. Mathematical Model of Sensor of Methane. The analysis of transients is carried out in the measuring chain of sensor of methane. The modes are considered influencing permanent time of thermal transients and methods of its diminishing

Keywords: control of methane, transients, mathematical model.

Є.М. Новіков. Математична модель термокаталітичного датчика метану. Виконано аналіз перехідних процесів у вимірювальній ланці термокаталітичного датчика метану. Розглянуті режими, що впливають на постійну часу теплових перехідних процесів, і засоби її зменшення.

Ключові слова: чутливі елементи, термокаталітичний контроль метану, перехідні процеси, математична модель.

© Новиков Е.Н., 2012