

УДК 621.317.39

В. А. КАРПОВ<sup>1</sup>, А. В. КОВАЛЕВ<sup>1</sup>,  
член-корреспондент А. И. РАТЬКО<sup>2</sup>, Н. С. МАЛЬЧЕНКО<sup>2</sup>

## ТЕРМОХИМИЧЕСКИЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ СЖИГАНИЕМ

<sup>1</sup>Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого,

<sup>2</sup>Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси

Поступило 16.11.2005

В настоящее время актуальна задача оптимального сжигания топлива в теплоэнергетических установках (ТЭУ). Одним из вариантов решения этого вопроса является использование газоаналитических систем контроля и управления процессами сжигания топлива в ТЭУ, основанных на анализе отходящих дымовых газов по кислороду и продуктам недожига, что позволяет сжигать топливо с предельно малым избытком кислорода, т. е. с высоким КПД. Основу подобных систем контроля и управления составляют стационарные газоанализаторы. Если они для измерения концентрации кислорода удовлетворяют современным требованиям, то приборы для контроля отходящих газов, основанные на термохимическом принципе действия, явно им не удовлетворяют. Поэтому для энергетических котлов применяется оптимальная концентрация монооксида углерода в режимном сечении 100–300 ppm. Выпускаемые приборы имеют диапазон измерения 400–10000 ppm [1], что явно недостаточно.

Цель данной работы – разработка способов повышения чувствительности газоанализаторов на основе термохимического принципа действия.

Современные термохимические датчики (ТХД) имеют чувствительность 1–2 мкВ/ppm и температурный дрейф 60–100 ppm/°C [2], который объясняется неидентичностью исполнения компенсационного и измерительного элементов по теплофизическим и электрическим параметрам. Естественно, что для анализа отходящих дымовых газов, где температура изменяется относительно номинальной на несколько десятков градусов, а требуемый диапазон измерения составляет 100–300 ppm, ТХД с типовым измерительным преобразователем не пригоден. Одним из вариантов решения данного вопроса является термостатирование объема контролируемой среды в котором находится ТХД [3]. При этом, для достижения требуемого диапазона измерения, колебание температуры в термостате должна быть на уровне  $\pm 0,1-0,2$  °C, что обеспечить в реальном условиях эксплуатации весьма проблематично хотя бы исходя из того, что температура в термостате поддерживается постоянной только в точке, где установлен термозащитный элемент, и это не гарантирует стабильности температуры в измерительном пространстве ТХД – реакционной камере. Вышеизложенное является сдерживающим фактором повышения чувствительности современных газоанализаторов.

В работе рассматривается подход, позволяющий повысить чувствительность ТХД за счет компенсации температурных изменений в реакционной камере путем измерения их с использованием компенсационного элемента (КЭ), работающего как термопреобразователь сопротивления с исключением его внутреннего разогрева. Измерительный элемент (ИЭ) запитывается рабочим током, как и в традиционной схеме включения ТХД [4]. Поскольку КЭ выполнен из Pt, то изменение его сопротивления с температурой имеет вид:  $R_K = R_{0K}(1 + \beta t - \gamma t^2)$ . Допустим, что сопротивление ИЭ изменяется также по квадратичному закону, но с другими коэффициентами  $\beta_1, \gamma_1$ , т. е.  $R_{И} = R_{0И}(1 + \beta_1 t - \gamma_1 t^2)$ .

Функциональная схема построения измерительного преобразователя представлена на рис. 1, где ИТ1, ИТ2 – источники тока для питания КЭ и ИЭ соответственно; Ус1, Ус2 – усилители постоянного тока с коэффициентами усиления  $K_{Ус1}$  и  $K_{Ус2}$  для КЭ и ИЭ; НЭ – нагревательный элемент, запитываемый от регулируемого источника тока ИТ3; Есм1, Есм2 – напряжения смещения Ус1 и Ус2, с помощью которых на выходах соответствующих усилителей добиваются нулевых сигналов при настройке; Ус3 – дифференциальный усилитель; R – потенциометр крутизны усиления канала измерения температуры, реализованного с помощью КЭ, Ус1, ИТ1. Измерительный канал состоит из ИТ2, Ус2, ИЭ, Ус3, R.

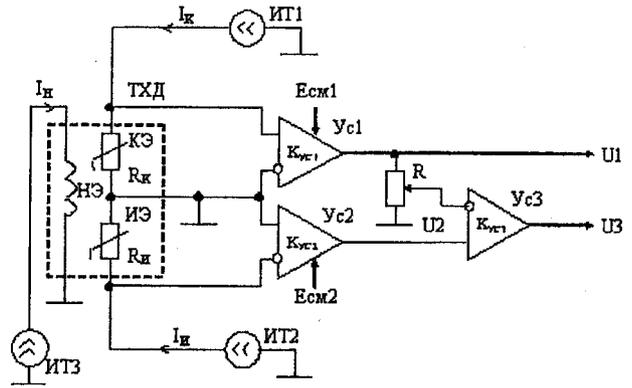


Рис. 1. Функциональная схема измерительного преобразователя для ТХД с каналом компенсации влияния температуры ИС

Настройка схемы осуществляется следующим образом. Пусть интервал рабочих температур определяется значениями  $t_1$  и  $t_1 + \Delta t_M$ . При начальной температуре  $t_1$ , изменяя Есм1 и Есм2, необходимо добиться нулевых показаний напряжений  $U_1$  и  $U_2$  на выходах усилителей Ус1 и Ус2, т. е.

$$\begin{cases} U_1 = K_{Ус1} I_K R_{0К} (1 + \beta t - \gamma t^2) - E_{СМ1} = 0, \\ U_2 = K_{Ус2} I_И R_{0И} (1 + \beta_1 t - \gamma_1 t^2) - E_{СМ2} = 0, \end{cases}$$

тогда выходные напряжения  $U_1$  и  $U_2$  для температуры  $t_1 + \Delta t_M$  будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} U_1 = K_1 (\beta \Delta t - 2\gamma t_1 \Delta t - \gamma \Delta t^2), \\ U_2 = K_2 (\beta_1 \Delta t - 2\gamma_1 t_1 \Delta t - \gamma_1 \Delta t^2), \end{cases}$$

где  $K_1 = K_{Ус1} I_K R_{0К}$ ,  $K_2 = K_{Ус2} I_И R_{0И}$ , а выходное напряжение  $U_3$  равно  $U_3 = U_2 - kU_1$ , или

$$U_3 = K_2 (\beta_1 \Delta t - 2\gamma_1 t_1 \Delta t - \gamma_1 \Delta t^2) - k K_1 (\beta \Delta t - 2\gamma t_1 \Delta t - \gamma \Delta t^2). \quad (1)$$

Устанавливая потенциометром R напряжение  $U_3$  равным нулю при температуре  $t_1 + \Delta t_M$ , находим коэффициент пропорциональности  $k$

$$U_3 = 0, \text{ следовательно } k = \frac{K_2 (\beta_1 \Delta t_M - 2\gamma_1 t_1 \Delta t_M - \gamma_1 \Delta t_M^2)}{K_1 (\beta \Delta t_M - 2\gamma t_1 \Delta t_M - \gamma \Delta t_M^2)}.$$

Подставляя значение  $k$  в выражение (1), проводя упрощения, получаем

$$U_3 = K_2 \frac{\beta \gamma_1 - \beta_1 \gamma}{\beta - 2\gamma t_1 - \gamma \Delta t_M} (\Delta t_M - \Delta t) \Delta t. \quad (2)$$

Взяв производную от  $U_3$  по  $\Delta t$  и приравняв ее нулю, найдем значение приращения температуры  $\Delta t^*$ , при котором  $U_3$  имеет максимальное значение

$$\frac{dU_3}{d\Delta t} = K_2 \frac{\beta \gamma_1 - \beta_1 \gamma}{\beta - 2\gamma t_1 - \gamma \Delta t_M} (\Delta t_M - 2\Delta t^*) = 0,$$

откуда  $\Delta t^* = \Delta t_{MAX}/2$ , т. е. максимальное отклонение нулевой точки измерительного преобразователя или максимальное значение дополнительной погрешности от изменения температуры измеряемой среды, имеет место в середине диапазона  $\Delta t_M$  и выглядит следующим образом:

$$U_{3 MAX} = U_3(\Delta t^*) = K_2 \frac{\beta \gamma_1 - \beta_1 \gamma}{\beta - 2\gamma t_1 - \gamma \Delta t_M} \cdot \frac{\Delta t_M^2}{4}. \quad (3)$$

Полученное соотношение позволяет оценить уход нулевой точки ТХД (максимальную дополнительную погрешность) в зависимости от температур настройки  $t_1$  и  $t_1 + \Delta t_M$ .

Для проверки данных соотношений по функциональной схеме был собран опытный образец измерительного преобразователя и подвергнут экспериментальному исследованию (рис. 1). Измерительный преобразователь работает следующим образом: ИЭ за счет протекания по нему рабочего тока  $I_p$  разогрев до температуры, необходимой для беспламенного окисления горючих компонентов, а КЭ запитан током  $I$ , исключая его разогрев (1–5 мА). В результате этого на выходах  $U_{c1}$  и  $U_{c2}$  формируются сигналы  $U_1$  и  $U_2$ , пропорциональные температуре измеряемой среды и приращению сопротивления на ИЭ, обусловленное наличием горючих компонентов в ИС. Диапазон температур ИС задается с помощью НЭ, выполненного в виде спирали из нихромовой нити, окружающей ТХД.

Для документирования характеристик приведенного ИП использовался многоканальный десятиразрядный АЦП, который в реальном масштабе времени передавал снимаемые данные в ПК. При этом выход температурного канала  $U_1$  подключен к одному из каналов АЦП, а к другому каналу – сигнал  $U_3$ . Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 2, где по оси абсцисс – отложено время, по оси ординат – значения  $U_3$  и  $U_1$ , а также три фрагмента полученных данных: *a* – медленное ступенчатое нагревание от 26 °С до 126 °С с настройкой в диапазоне  $t_1 = 26$  °С,  $t_1 + \Delta t_M = 126$  °С; *b* – медленное ступенчатое нагревание от 26 °С до 200 °С с настройкой в диапазоне  $t_1 = 26$  °С,  $t_1 + \Delta t_M = 126$  °С; *c* – медленное ступенчатое остывание реакционной камеры в диапазоне настройки  $t_1 = 26$  °С,  $t_1 + \Delta t_M = 200$  °С.

Пересчитанные зависимости  $U_3(t_1 + \Delta t)$  для тех же фрагментов, где точками обозначены значения экспериментально снятого напряжения  $U_3$  от  $U_1$ , представлены на рис. 3, откуда видно совпадение экспериментальных данных с зависимостью (2). Для подтверждения этого, например, найдем коэффициент в выражении (2), зависящий только от параметров ИП и ТХД.

Из работы [5], используя значения  $\beta = 3,908 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и  $\gamma = 5,802 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ , а также данные для фрагмента *c* (рис. 3)  $\Delta t_M = 174$  °С,  $t_1 = 26$  °С,  $U_3 = 0,142$  В, имеем:

$$K = K_2(\beta\gamma_1 - \beta_1\gamma) = \frac{4U_3(\Delta t^*)(\beta - 2\gamma t_1 - \gamma\Delta t_{MAX})}{\Delta t_{MAX}^2} = 7,073 \cdot 10^{-8} \left( \frac{B}{^\circ\text{C}^2} \right).$$

Из полученного коэффициента определяем максимальное напряжения  $U_3$  для фрагмента *a*, из которого  $t_1 = 26$  °С,  $t_1 + \Delta t_M = 126$  °С,  $\Delta t_M = 100$  °С:  $U_3 = 0,046$  В, что соответствует экспериментальным данным  $U_3 = 0,048$  В и хорошо согласуется с рассчитанными.

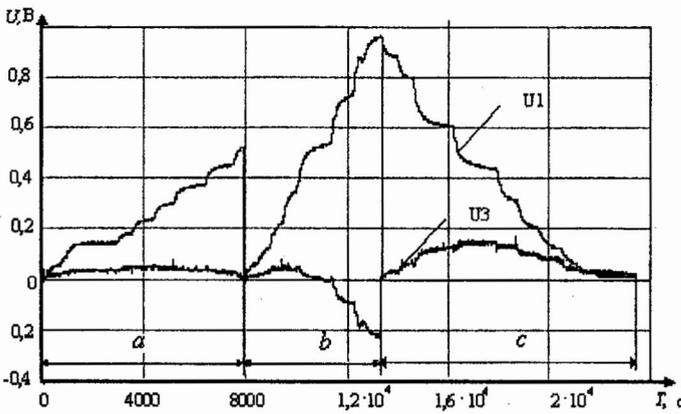


Рис. 2. Результаты экспериментального исследования ИП

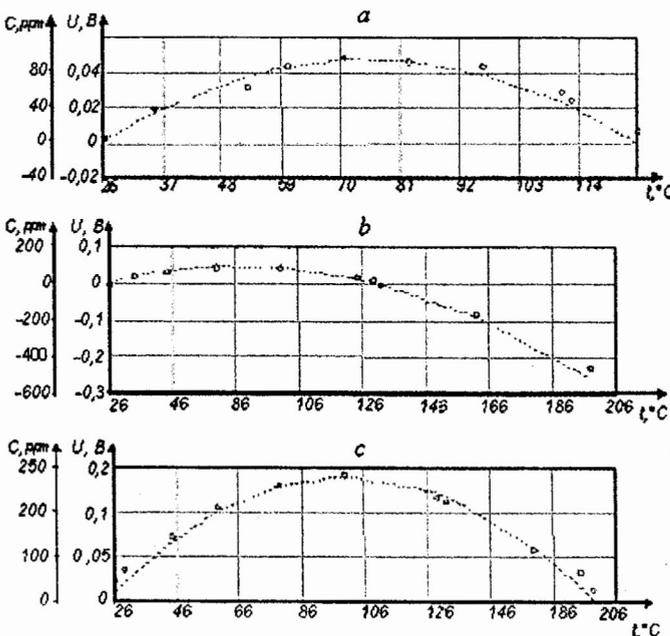


Рис. 3. Экспериментальные зависимости  $U_3$  от  $U_1$  измерительного преобразователя

При заданном коэффициенте усиления  $K_2$ , чувствительность ИП составила 0,5 мВ/ррт. Ординаты в размерности ррт представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что абсолютная погрешность ИП для соответствующих фрагментов на заданных участках настройки равна:  $a - 88$  ррт,  $b - 500$  ррт,  $c - 240$  ррт.

Таким образом, описанный метод позволяет существенно снизить требования к термостатированию ИС. Например, уменьшая диапазон настройки  $t_1, t_1 + \Delta t_M$  для фрагмента  $a$  в 10 раз, требования к термостатированию ИС должны находиться на уровне  $\pm 10$  °С, что вполне реализуемо. При этом дополнительная погрешность от изменения температуры ИС составит  $\pm 1-2$  ррт.

Опытный образец термохимического газоанализатора уже прошел испытания на паровом котле Е7-2. Изменения температуры в реакционной камере, вызванное отклонением режимов работы котла от номинального, составило  $\Delta t_M = 37$  °С. Расхождение значений, измеренных TESTO-350 и опытного образца газоанализатора, настроенного в этом диапазоне, составило не более  $\pm 20$  ррт при крайних режимах соотношение воздух/топливо котла.

Следует отметить, что предложенный способ построения ИП не предполагает требований к идентичности исполнения элементов датчика. Вышеописанный метод повышения чувствительности ИП для ТХД дает основание применения его в газоаналитических системах контроля и управления процессами сжигания топлива.

### Литература

1. Б о б р о в В. В. // Энергоэффективность. 2001. № 11. С. 20–22.
2. Элемент чувствительный ЧЭ ТКС-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Мн., 2000.
3. Анализатор технологических газов. АГТ-СО. Техническое описание. Республика Беларусь 14561854.002-95.
4. К а р п о в Е. Ф., Б и р е н б е р г И. Э., Б а с о в с к и й Б. И. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы. М., 1984.
5. ГОСТ 6651-94. Термопреобразователи сопротивления. Общие технические требования и методы испытаний. М., 1995.

*KARPOV V. A., KOVALEV A. V., RATKO A. I., MALCHENKO N. S.*

### **THERMOCHEMICAL GAS ANALYZER OF ELEVATED SENSITIVITY FOR MONITORING SYSTEMS AND INCINERATION CONTROL**

### Summary

The approach permitting one to raise the accuracy of thermochemical gas analyzers at the expense of temperature changes in a soaking drum by their measurement with the use of a compensative unit operating as a resistance thermoelement is considered. Theoretical and experimental studies of the proposed engineering resolution on the sensitivity and additional error in the temperature range up to 200 °С are outlined. Due to such an approach the lower threshold of measurement range in the thermochemical method approximates to a level of electrochemical resources of measurement.