

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ

Вовна А.В., доц. к.т.н. (Ph.D.); Левшов М.М., студент

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина)

Общая постановка проблемы. Для повышения экономичности любого процесса горения и для сведения к минимуму выбросов в атмосферу загрязняющих веществ необходимо детальное изучение и контроль соотношения «воздух/топливо». Наличие большого количества факторов, влияющих на результаты измерений (температура, давление, запыленность и т.д.), затрудняет создание газоанализаторов с требуемыми показателями быстродействия, точности и метрологической надежности. Поэтому разработка и внедрение измерительных приборов концентрацией кислорода в дымовых газах является актуальной.

Постановка задач исследования. Целью работы является разработка математической модели измерительного прибора концентрации кислорода в дымовых газах, которая учитывает влияния изменения дестабилизирующих факторов (температуры, атмосферного давления и избыточного давления дымовых газов котлов), для получения характеристики преобразования измерителя и постановки требований к макетному образцу прибора.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- разработать и исследовать математическую модель измерителя концентрации кислорода;
- поставить требования к разработке макетного образца измерительного прибора концентрации кислорода в дымовых газах.

Результаты разработки и исследований. Из проведенного анализа следует, что наиболее подходящими средствами измерения для контроля концентрации кислорода в дымовых газах котлов являются измерительные приборы на основе твердых электролитов, которые в определенном диапазоне температур обладают практически ионной проводимостью. В качестве чувствительного элемента используется пробирка из диоксида циркония, которая легирована оксидом иттрия или диоксидом кальция. Характеристика преобразования данного измерителя может быть описана уравнением Нернста [1]:

$$E = \frac{R \cdot T}{4 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{p'_{O_2}}{p''_{O_2}} \right), \quad (1)$$

где E – э.д.с. твердоэлектролитической ячейки, В; R – универсальная газовая постоянная, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$; T – температура твердоэлектролитической ячейки по абсолютной шкале, К; F – постоянная Фарадея, $\frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$; p'_{O_2} и p''_{O_2} – парциальные давления кислорода в измерительной среде и в атмосферном воздухе, Па.

Э.д.с. твердоэлектролитической ячейки ($TЭЯ$) определяют как разницу двух электродных потенциалов: потенциала рабочего электрода и электрода сравнения. Если электрод сравнения омывается кислородом с атмосферным давлением $P_0 = 101,325$ кПа, а концентрация кислорода в атмосфере составляет $C_{O_2} = 20,94$ %^{об.}, то парциальное давление кислорода в атмосфере может быть рассчитано по следующему соотношению [2]:

$$p_{O_2} = \frac{P_0 \cdot C_{O_2}}{100} = \frac{101,325 \cdot 10^3 \cdot 20,94}{100} = 21,2 \text{ кПа}. \quad (2)$$

Из анализа изменения парциального давления видно, что:

– при изменении концентрации кислорода в атмосфере от 19 до 20^{об.%} при неизменном атмосферном давлении $P_0 = 101,3$ кПа относительное изменение парциального давления составляет:

$$\begin{aligned}\delta_{p_{O_2}}^{\Delta C} &= \frac{p_{O_2}(P_0, C_{O_2} = 20^{\text{об.}\%}) - p_{O_2}(P_0, C_{O_2} = 19^{\text{об.}\%})}{p_{O_2}(P_0, C_{O_2} = 20^{\text{об.}\%})} \cdot 100 = \\ &= \frac{20,265 - 19,252}{20,265} \cdot 100 = 5\%.\end{aligned}$$

– при изменении атмосферного давления от 84 до 106,7 кПа при неизменной концентрации кислорода в атмосфере $C_{O_2} = 20,94$ об.% относительное изменение парциального давления:

$$\begin{aligned}\delta_{p_{O_2}}^{\Delta P} &= \frac{p_{O_2}(P = 101,3 \text{ кПа}; C_{O_2}) - p_{O_2}(P = 84 \text{ кПа}, C_{O_2})}{p_{O_2}(P_0 = 101,3 \text{ кПа}, C_{O_2})} \cdot 100 = \frac{21,212 - 17,590}{21,212} \cdot 100 = 17,1\%; \\ \delta_{p_{O_2}}^{\Delta P} &= \frac{p_{O_2}(P = 101,3 \text{ кПа}; C_{O_2}) - p_{O_2}(P = 106 \text{ кПа}, C_{O_2})}{p_{O_2}(P_0 = 101,3 \text{ кПа}, C_{O_2})} \cdot 100 = \frac{21,212 - 22,196}{21,212} \cdot 100 = -4,6\%.\end{aligned}$$

Поэтому для контроля концентрации кислорода в дымовых газах котлов с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$ необходимо выполнять измерений атмосферного давления в диапазоне от 84 до 106 кПа с относительной погрешностью измерений не более $\pm 5\%$.

Избыточное давление контролируемой газовой смеси изменяется в диапазоне от $-3,9$ до $+4,4$ кПа. Из анализа характеристики изменения парциального давления кислорода в анализируемой газовой смеси видно, что при изменении избыточного давления дымовых газов от $-3,9$ до $4,4$ кПа при неизменной концентрации кислорода $1,0$ об.% относительное изменение парциального давления составляет:

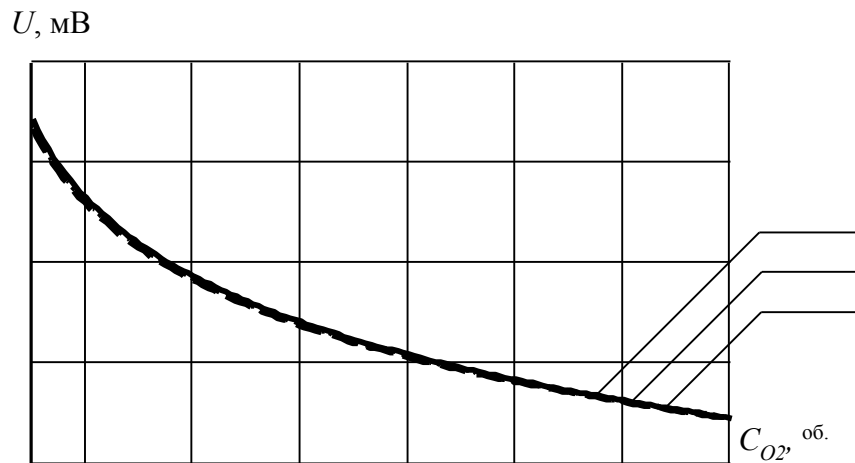
$$\begin{aligned}\delta_{p_{O_2}}^{\Delta C} &= \frac{p_{O_2}(\Delta P = -3,9 \text{ кПа}, C_{O_2} = 1,0^{\text{об.}\%}) - p_{O_2}(\Delta P = 0 \text{ кПа}, C_{O_2} = 1,0^{\text{об.}\%})}{p_{O_2}(\Delta P = 0 \text{ кПа}, C_{O_2} = 1,0^{\text{об.}\%})} \cdot 100 = \\ &= \frac{0,974 - 1,013}{1,013} \cdot 100 = -3,8\%; \\ \delta_{p_{O_2}}^{\Delta C} &= \frac{p_{O_2}(\Delta P = 4,4 \text{ кПа}, C_{O_2} = 1,0^{\text{об.}\%}) - p_{O_2}(\Delta P = 0 \text{ кПа}, C_{O_2} = 1,0^{\text{об.}\%})}{p_{O_2}(\Delta P = 0 \text{ кПа}, C_{O_2} = 1,0^{\text{об.}\%})} \cdot 100 = \\ &= \frac{1,057 - 1,013}{1,013} \cdot 100 = +4,3\%.\end{aligned}$$

Поэтому для контроля концентрации кислорода в дымовых газах с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$ необходимо выполнять измерения избыточного давления в диапазоне от $-3,9$ до $4,4$ кПа с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$.

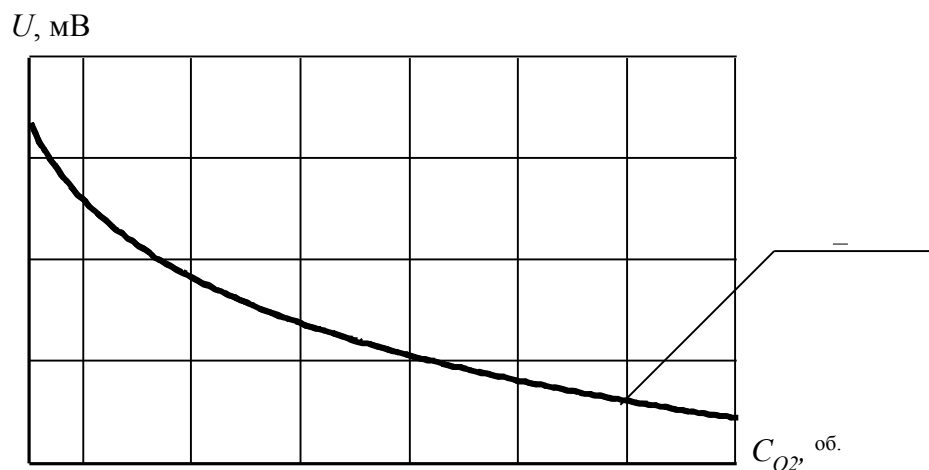
На основании экспериментальных данных определения э.д.с. сдвига [3], которые проведены при равенстве концентраций кислорода на электродах. Температура управлялась с помощью программного регулятора. Измерения проведены в двух разных режимах:

– плавное изменение температуры в диапазоне от 749 до 775°C ($\Delta T = 26^\circ\text{C}$), при этом диапазон изменения э.д.с. сдвига составлял от $1,7$ до $2,05$ мВ (см. рис. 1, а);

– периодическое изменение температура в диапазоне от $749,6$ до $750,3^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 0,7^\circ\text{C}$) с интервалом 10 с., диапазон изменения э.д.с. сдвига в данном эксперименте составлял от $1,85$ до $2,15$ мВ (см. рис. 1, б).



а) изменение температуры в диапазоне от 749 до 775°C ($\Delta T=26^\circ\text{C}$)



б) от 749,7 до 750,3°C ($\Delta T=0,6^\circ\text{C}$) с интервалом 10 с

Рисунок 1 – Изменение напряжения на выходе ТЭЯ при изменении концентрации кислорода в диапазоне от 1 до 14^{об.%} при разном режиме терморегулятора

Из анализа полученных результатов (см. рис. 1) следует, что зависимость э.д.с. от температуры более чем на порядок ниже, чем от ее производной по времени. Процессы теплопроводности, происходящие в корпусе измерительного преобразователя, имеют разные скорости распространения тепла в ячейке. Поэтому температура распределена по объему неравномерно: на торцевых поверхностях, где расположены электроды, она имеет разное значение. В результате разницы температур в твердом электролите возникает термо-э.д.с., которая при равенстве концентраций кислорода на электродах приводит к появлению электрического напряжения на ячейке. В случае неравных концентраций кислорода термо-э.д.с. вносит дополнительную разницу потенциалов, и определения концентрации с помощью уравнения Нернста, при концентрации кислорода 10^{об.%} термо-э.д.с. величиной 1 мВ приводит к погрешности не более 0,3^{об.%}

В связи с этим для уменьшения переменной составляющей э.д.с. сдвига, что в свою очередь уменьшает погрешность измерения концентрации кислорода, необходимо использовать плавный регулятор температуры чувствительного элемента. Вследствие этого температурная неравномерность по объему термоэлектролитической ячейки сводится к минимуму.

Требования к установке температуры плавным регулятором:

- номинальное значение температуры твердоэлектролитической ячейки, °C 750;
- диапазон изменения установки температуры, °C от 749 до 751;
- значение абсолютной погрешности установки температуры, °C $\pm 0,3$;
- постоянная времени терморегулятора, с не более 10.

Регулировка температуры $TЭЯ$ осуществляется с помощью нагревателя внутри измерительного преобразователя. Напряжение, подаваемое на нагреватель, регулируется в измерительном блоке.

График зависимости выходного напряжения $TЭЯ$ от концентрации кислорода в диапазоне от 1 до 14 $\text{об.}\%$ при избыточном давлении газовой смеси от $-3,9$ до $4,4$ кПа приведено на рисунке 2.

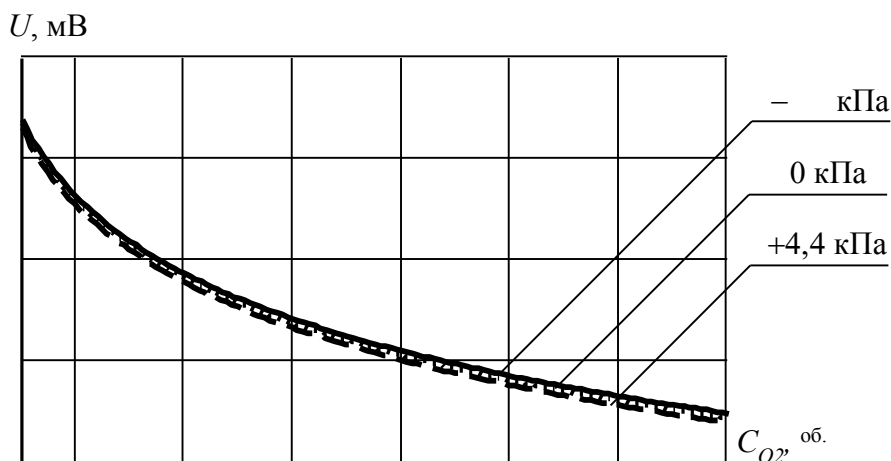


Рисунок 2 – Зависимости выходного напряжения $TЭЯ$ от концентрации кислорода в диапазоне от 1 до 14 $\text{об.}\%$ при избыточном давлении смеси от $-3,9$ до $4,4$ кПа

Из анализа приведенной зависимости (см. рис. 2) следует, что

– максимальный уровень выходного напряжения $TЭЯ$ отвечает минимальной концентрации кислорода $C_{O_2} = 1 \text{ об.}\%$ и минимальному избыточному давлению газовой смеси $P_2 = -3,9$ кПа:

$$U_{\text{ВЫХ}}(C_{O_2} = 1 \text{ об.}\%; P_2 = -3,9 \text{ кПа}) = 67,7 \text{ мВ};$$

– минимальный уровень выходного напряжения $TЭЯ$ отвечает максимальной концентрации кислорода $C_{O_2} = 14 \text{ об.}\%$ и максимальному избыточному давлению газовой смеси $P_2 = +4,4$ кПа:

$$U_{\text{ВЫХ}}(C_{O_2} = 14 \text{ об.}\%; P_2 = 4,4 \text{ кПа}) = 7,9 \text{ мВ}.$$

Чувствительность $TЭЯ$ при изменении:

– концентрации кислорода составляет:

$$S_C = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}(\Delta C_{O_2}; P_2 = \text{const})}{\Delta C_{O_2}} = \frac{7,9 - 67,7}{14 - 1} = -4,7 \frac{\text{мВ}}{\text{об.}\%};$$

– избыточного давления:

$$S_P = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}(C_{O_2} = \text{const}; \Delta P_2)}{\Delta P_2} = \frac{7,9 - 9,7}{4,4 - (-3,9)} = -0,22 \frac{\text{мВ}}{\text{кПа}}.$$

Для повышения чувствительности измерительного преобразователя концентрации кислорода, а также проведения масштабирования его выходного сигнала к унифицированному уровню необходимо использовать аналоговый блок усилителей. Выходной сигнал $TЭЯ$ является разностным дифференциальным сигналом напряжения. Для его усиления и преобразования к формату входных сигналов аналого-цифрового преобразователя ($АЦП$) необходимо использовать аналоговый блок для перехода от незаземленной к заземленной нагрузке, структурная схема которого приведена на рисунке 3.

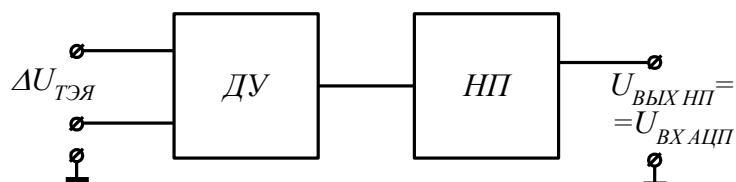


Рисунок 3 – Структурная схема аналогового блока измерительного прибора концентрации кислорода

На рисунке 3 обозначено: *ДУ* – дифференциальный (разностный) усилитель; *НП* – нормирующий преобразователь; $\Delta U_{ТЭЯ}$ – выходной дифференциальный сигнал *ТЭЯ*; $U_{ВЫХ НП}$ – выходной сигнал нормирующего преобразователя; $U_{ВХ АЦП}$ – входной сигнал *АЦП*.

Дифференциальный усилитель выполняет вычитание выходного сигнала *ТЭЯ* и его предварительное усиление. Для уменьшения температурного дрейфа усилителя и увеличения коэффициента подавления синфазной составляющей во входном сигнале рекомендуется выбирать коэффициент передачи по напряжению *ДП* не более (10...15). Нормирующий преобразователь выполняет функцию масштабирования выходного сигнала измерительного канала к формату входного сигнала *АЦП*. Также *НП* устраняет аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности в аналоговом измерительном канале. Диапазон выходного сигнала *НП* составляет от 0 до + 5 В.

Выводы. При разработке и исследовании математической модели измерительного прибора концентрации кислорода в дымовых газах были получены следующие результаты:

1. Разработанная математическая модель измерительного преобразователя концентрации кислорода на базе твердоэлектrolитической ячейки, которая учитывает изменение комплекса дестабилизирующих факторов: атмосферного давления, избыточного давления; температуры дымовых газов.

2. Для контроля концентрации кислорода в дымовых газах с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$ необходимо выполнять измерение избыточного давления в диапазоне от $-3,9$ до $4,4$ кПа с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$.

3. Разработаны требования к установке температуры плавным регулятором:

- диапазон изменения установки температуры, °С от 749 до 751;
- значение абсолютной погрешности установки температуры, °С $\pm 0,3$;
- постоянная времени терморегулятора, с не более 10.

4. При математическом моделировании средства измерения проведены оценки показателей чувствительности по выходному напряжению измерительного прибора концентрации кислорода в дымовых газах:

- при изменении концентрации кислорода $5,33$ В/об.%;
- при изменении избыточного давления $20,6$ мВ/кПа.

Перечень ссылок

1. Аналитическая химия: учебник: в 2-х кн., кн. 2: Физико-химические методы анализа / Под. ред. В.П. Васильева. – [5-е изд., стер.]. – М.: Дрофа, 2005. – 383 с.

2. Справочник химика: в 6 т. Т. 4: Аналитический анализ, спектральный анализ, показатели преломления / Под. общ. ред. Б.П. Никольского. – Л.: Химия Ленингр. отделение. – 1967. – 920 с.

3. Гофман М.А. Повышение точности измерения концентрации кислорода в цифровых твердоэлектrolитных газоанализаторах / М.А. Гофман, М.В. Колечкин, О.И. Потатуркин, П.А. Чубаков // Автометрия. Российская академия наук. Сибирское отделение. – 2000. – № 6. – С. 82 – 87.

4. Вечер А.А. Твердые электrolиты. / А.А. Вечер, Д.В. Вечер Д.В. Минск: Университетское изд., 1988. – 110 с.