

### Раздел III. Алгоритмическое и программное обеспечение

УДК 543.421:621.38

**А.В. Вовна, А.А. Зори, Н.П. Косарев**

#### **ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА СОСТАВНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

*Рассмотрены вопросы повышения чувствительности и точности оптико-абсорбционного измерителя концентрации метана. Предложен способ компенсации шума и его аппаратная реализация в выходном сигнале первичного оптоэлектронного измерительного преобразователя. Для увеличения чувствительности измерителя необходимо увеличивать длину измерительной базы. Как показали экспериментальные исследования, с учетом трудности юстировки оптической системы для обеспечения соосности источника и приемника излучения, рекомендуется ограничить длину базы оптического канала до (100–150) мм. Использование предложенного способа компенсации шума на основе метода составных параметров в выходном сигнале первичного оптоэлектронного преобразователя и его аппаратной реализации позволяет уменьшить величину основной абсолютной погрешности измерений до  $\pm 0,1$  об.%, что примерно в 2 раза увеличивает чувствительность измерителя концентрации метана.*

*Измеритель; метан; чувствительность; метрологические характеристики; шум.*

**A.V. Vovna, A.A. Zori, N.P. Kosarev**

#### **THE INCREASING OF SENSITIVITY OF MEASURING GAS CONCENTRATIONS USING THE METHOD OF COMPOSITE PARAMETERS**

*The sensitivity and accuracy increasing problems of optical-absorption methane concentration measuring were reviewed. A method for noise compensation and its hardware implementation in the output signal of the primary optoelectronic transmitter was proposed. To increase the measuring device sensitivity is necessary to increase the measuring base length. As shown by experimental investigation taking into account the optical system adjusting difficulties to ensure radiation source alignment and detector, it is recommended to limit the optical channel length to the base (100–150) mm. Using the proposed compensation method on the basis of the noise component parameters in the primary optoelectronic converter output signal and its hardware implementation can reduce the basic error amount of measurement to that approximately doubles the methane concentration measuring sensitivity.*

*Measurer; methane; sensitivity; the metrological characteristics; noise.*

**Общая постановка проблемы.** Для решения проблем, связанных с безопасностью условий труда на промышленных предприятиях, в частности для предупреждения взрывоопасных ситуаций, необходимо постоянно контролировать изменения состава атмосферы рабочей зоны. Поскольку одним из совершенных газоаналитических измерителей для данных целей является оптико-абсорбционный, то для улучшения его метрологических характеристик целесообразно исследовать методы и средства повышения его чувствительности и точности с учетом сложных производственных условий.

**Постановка задачи исследования.** При разработке и исследовании макетного образца измерителя концентрации метана, основанного на оптико-абсорбционном методе измерения концентрации газов, возникает задача улучшения его метрологических характеристик. Согласно требованиям [1], значение основной абсолютной погрешности данного типа измерителей концентрации метана составляет  $\pm 0,2^{об.}\%$  в диапазоне от 0 до  $4^{об.}\%$ . Для повышения точности измерителя путем увеличения соотношения сигнал/шум необходимо разработать способ уменьшения шумов первичного оптоэлектронного преобразователя и средства для аппаратной реализации.

**Решение задачи и результаты исследования.** В основу построения измерителя положен закон Бугера, который связывает интенсивность поглощения  $I_{ВЫХОД}$  с длиной волны ИК-излучения  $\lambda$ , длиной пути  $l$  оптического излучения, концентрацией исследуемого газового компонента  $C_{CH_4}$  и описывается выражением [2]

$$I_{ВЫХОД}(C_{CH_4}, T, P, \lambda, l) = I_{ВХОД} \cdot e^{-K(\lambda, T, P)C_{CH_4}l},$$

где  $I_{ВХОД}$  и  $I_{ВЫХОД}$  – интенсивности входного и выходного потоков оптического излучения, Вт/срад, величины потоков пропорциональны входному  $\Phi_{ВХОД}$ , Вт и выходному  $\Phi_{ВЫХОД}$ , Вт потокам оптического излучения;  $C_{CH_4}$ , моль/см<sup>3</sup> – молярная концентрация метана в измерительном канале;  $l$ , м – толщина анализируемого слоя вещества, равная длине измерительного канала;  $K(\lambda, T, P)$  – коэффициент сечения спектра поглощения оптического излучения метаном, зависящий от температуры  $T$ , К и давления  $P$ , кПа рудничной атмосферы.

В качестве источника ИК-излучения использовался светоизлучающий диод (СИД) LED34–PRW [3], а в качестве приемника ИК-излучения выбран фотодиод (ФД) PD36–05–PR [3], так как его спектральные характеристики наиболее близки и согласованы со спектральными характеристиками выбранного СИД. Сигнал тока  $I_{ФД}$  ФД определяется соотношением

$$I_{ФД}(C_{об\%}, T, P, l) = S_{СИД}(T)\Phi_{ВЫХОД}(C_{об\%}, T, P, l),$$

где  $S_{СИД\max} = 1,1$  А/Вт – максимальная интегральная чувствительность ФД к сигналу [3].

Для оценки влияния конструктивного параметра измерителя – длины оптического пути на результат измерений концентрации метана – использована методика определения результатов косвенных измерений и оценки их погрешностей, согласно которой допустимое значение абсолютной погрешности измерения тока ФД может быть определено по формуле

$$\Delta I_{ФД} = k \sqrt{\left(\frac{\partial I_{ФД}}{\partial C_{об\%}} \cdot \Delta C_{об\%}\right)^2 + \left(\frac{\partial I_{ФД}}{\partial l} \cdot \Delta l\right)^2},$$

где  $k = 1,1$  при доверительной вероятности 0,95;  $\Delta C_{об\%}$ ,  $\Delta l$  – абсолютные погрешности измерений объемной концентрации метана и длины оптического канала.

Для расчета и обоснования основного конструктивного параметра измерителя, непосредственно определяющего чувствительность, – длины базы оптического канала ( $l$ , мм) – выполнен расчет относительного изменения выходного тока ФД. Данное изменение ( $\delta I_{ФД}(T, P, l)$ ) определяется как разность между значениями выходного

тока ФД при минимальной ( $C = 0^{об.}\%$ ) и максимальной ( $C = 4^{об.}\%$ ) концентрациях метана в измерительном канале, приведенных к значению тока при минимальной концентрации ( $C = 0^{об.}\%$ ), и может быть рассчитано по соотношению [2]

$$\delta I_{\text{ФД}}(T, P, l) = \frac{I_{\text{ФД}}(C_{об\%} = 0, T, P, l) - I_{\text{ФД}}(C_{об\%} = 4, T, P, l)}{I_{\text{ФД}}(C_{об\%} = 0, T, P, l)} \cdot 100.$$

Из результатов проведенного моделирования следует, что при длине измерительной базы  $l = 50$  мм относительное изменение тока ФД составляет 4 %, при увеличении длины до 100 мм величина  $\delta I_{\text{ФД}}$  возрастает до 7 %. Следовательно, для увеличения чувствительности измерителя концентрации метана необходимо увеличение длины измерительной базы. Однако при этом возрастают трудности с юстировкой оптической системы, т.е. обеспечения соосности источника и приемника излучения. Поэтому рекомендуется ограничить длину базы оптического канала от 100 до 150 мм, при этом значения  $\delta I_{\text{ФД}}$  составляют (7–10) %.

Другой основной задачей проведенных исследований, направленных на повышение чувствительности измерителя, является снижение уровня шума в выходном сигнале ФД PD36–05–PR. Так, при питании СИД LED34–PRW импульсами тока амплитудой  $I_{\text{LED34}} = 200$  мА со скважностью  $q = 0,5$  отношения сигнал/шум составлял и (3–5), что недопустимо. Предложено увеличить амплитуду питающих импульсов тока до величины (1,4–1,6) при скважности 0,02–0,04. Отношение сигнал/шум в данном случае составляет 30–40, что практически полностью удовлетворяет условиям промышленной эксплуатации подобного типа измерителей. При измерении же малых значений концентрации исследуемых газовых компонент на уровне основной абсолютной погрешности измерений  $\pm 0,2^{об.}\%$  величина отношения сигнал/шум снижается до уровня 3–4, что не обеспечивает выполнения данных измерений с заданной точностью.

Для повышения данного показателя предложено использовать метод составных параметров, который в отличие от метода отрицательной обратной связи не является универсальным, так как для уменьшения действия изменяющего фактора шума ФД в измеритель необходимо вводить аппаратную избыточность в виде отдельного оптоэлектронного компонента для уменьшения влияния шума на характеристику преобразования измерителя.

Пусть случайная погрешность  $\Delta_{\xi}$  вызвана влиянием шумов и собственных случайных изменений параметров измерителя концентрации метана. Погрешность  $\Delta_{\xi}$  имеет нулевое математическое ожидание. Предложено ввести в схему измерителя дополнительный компенсационный фотодиод, вызывающий центрированную случайную составляющую шума  $\Delta_k$ , коррелированную с  $\Delta_{\xi}$ . При этом остаточная случайная составляющая погрешности становится равной

$$\Delta_0 = \Delta_{\xi} - \Delta_k.$$

Пусть собственная случайная составляющая погрешности измерителя характеризуется дисперсией  $D[\Delta_{\xi}]$ . Для компенсации данной погрешности выбран дополнительный ФД с сигналом шума, близкого к закону распределения шумов измерителя концентрации метана, который характеризуется случайной погрешностью  $\Delta_k$  с дисперсией  $D[\Delta_k]$ . Дисперсия остаточной погрешности с учетом компенсации определяется выражением

$$D[\Delta_0] = D[\Delta_{\xi}] + D[\Delta_k] - 2 \cdot \rho_k \sqrt{D[\Delta_{\xi}] \cdot D[\Delta_k]},$$

где  $\rho_k$  – нормированный коэффициент взаимной корреляции погрешностей  $\Delta_{\xi}$  и  $\Delta_k$ ; для лучшей компенсации коэффициент  $\rho_k$  должен быть ближе к 1.

При проведении исследований выявлено, что даже при выборе практически одинаковых по характеристикам и параметрам фотодиодов коэффициент корреляции их выходных сигналов не более 0,1. Поэтому при реализации метода составных параметров предложено использовать в качестве компенсационного сигнала видоизмененный выходной сигнал измерительного ФД. Исходный выходной сигнал ФД в амплитуде содержит информацию об измеряемой концентрации метана, после преобразования в сигнал напряжения состоит из двух составляющих: информационного импульсного сигнала, амплитуда которого не более 1 В со скважностью (0,02–0,04), и шумовой составляющей, которая имеет нормальный закон распределения со следующими параметрами: математическое ожидание  $m_x=0$  В; среднеквадратичное отклонение  $\sigma_x=50$  мВ; объем выборки  $N=1000$  (рис. 1).

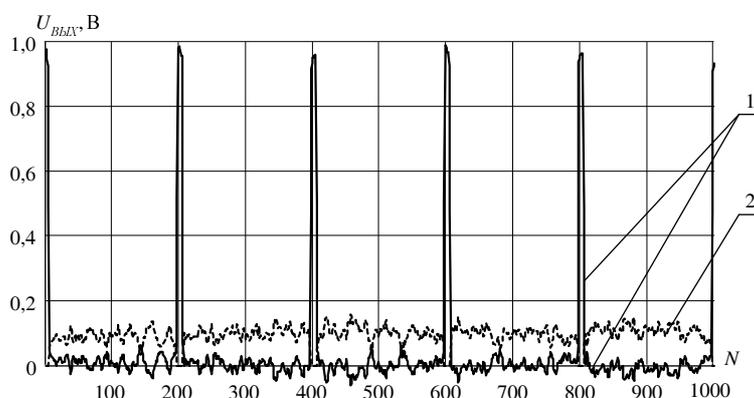


Рис. 1. Выходные информационный (1) и компенсационный (2) сигналы первичного оптоэлектронного измерительного преобразователя концентрации метана

Для реализации предложенного способа компенсации шума необходимо сформировать из выходного сигнала измерительного преобразователя компенсационный сигнал для последующего суммирования его с исходным сигналом измерителя концентрации метана. Аппаратная реализация этого метода приведена на рис. 2.

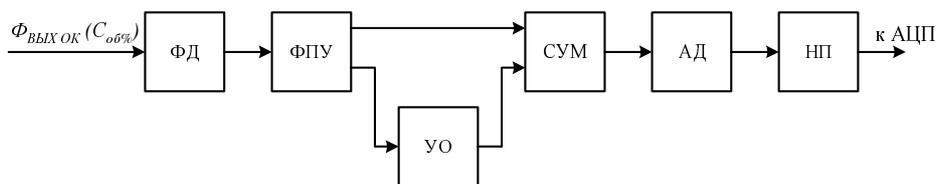


Рис. 2. Аппаратная реализация метода составных параметров опико-абсорбционного измерителя концентрации газов

Здесь  $\Phi_{ВЫХОК}(C_{об\%})$  – выходной ИК-поток, содержащий информацию об измеряемой концентрации метана; ФД – фотодиод; ФПУ – фотоприемный усилитель; УО – усилитель-ограничитель; СУМ – сумматор; АД – амплитудный детектор; НП – нормирующий преобразователь; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

Для формирования компенсационного сигнала из выходного сигнала ФПУ используется УО, который рекомендуется построить по схеме инвертирующего включения операционного усилителя. УО обеспечивает сдвиг фазы выходного сигнала на  $180^\circ$  и ограничивает отрицательное выходное напряжение на уровне 0 В (схема с однополярным питанием). УО обеспечивает единичный коэффициент передачи по напряжению и содержит схему компенсации аддитивной составляющей погрешности измерений путем подачи на неинвертирующий вход напряжения смещения амплитудой (0,1–0,2) В. Выходной сигнал УО приведен на рис. 1. Суммирование исходного сигнала с выхода ФПУ и компенсационного сигнала УО выполняется сумматором (СУМ), выходное напряжение которого приведено на рис. 3.

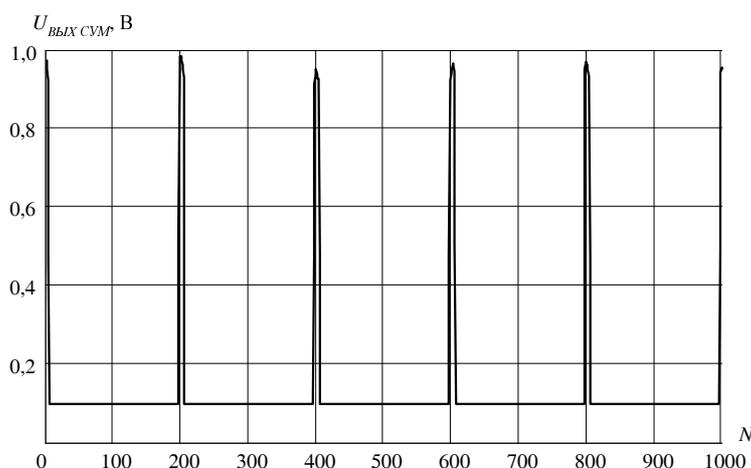


Рис. 3. Выходной сигнал первичного оптоэлектронного измерительного преобразователя после компенсации шума

Дальнейшее преобразование выходного сигнала осуществляется АД, который преобразует амплитуду выходного импульсного сигнала в среднее значение, пропорциональное концентрации метана. НП нормирует характеристику преобразования до необходимого входного уровня АЦП. После чего информация передается в микропроцессорный блок для расчета измеряемой концентрации метана и выдачи сигналов в систему аэрогазовой защиты угольных шахт и промышленных предприятий.

#### Выводы.

1. Для увеличения чувствительности измерителя необходимо увеличивать длину измерительной базы. Как показали исследования, с учетом трудности с юстировкой оптической системы для обеспечения соосности источника и приемника излучения, рекомендовано ограничить длину базы оптического канала до (100–150) мм.

2. Использование предложенного способа компенсации шума на основе метода составных параметров в выходном сигнале первичного оптоэлектронного преобразователя и его аппаратной реализации позволяет уменьшить величину основной абсолютной погрешности измерений до  $\pm 0,1^{\text{об.}}\%$ , что примерно в 2 раза увеличивает чувствительность измерителя концентрации метана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания: ДСТУ ГОСТ 24032:2009. – [Действующий от 2009-02-01]. – Киев: Держспоживстандарт, 2009. – 24 с.
2. *Вовна А.В.* Методы и средства аналитического измерения концентрации газовых компонент и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт / А.В. Вовна, А.А. Зори, В.Д. Коренев, М.Г. Хламов. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 260 с.
3. Ioffe Physico-Technical Institute [Электронный ресурс] / Mid-IR Diode Optopair Group (MIRDOG). – Электронные данные. – Режим доступа: <http://mirdog.spb.ru>. – Дата доступа: январь 2012. – Загл. с экрана.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., проф. А.Е. Панич.

**Вовна Александр Владимирович** – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»; e-mail: [Vovna\\_Alex@ukr.net](mailto:Vovna_Alex@ukr.net); 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, Украина; тел.: +380623045571; +380623010918; кафедра электронной техники; к.т.н., доцент.

**Зори Анатолий Анатолиевич** – кафедра электронной техники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Косарев Николай Павлович** – кафедра электронной техники; к.т.н.; доцент.

**Vovna Aleksander Vladimirovich** – State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”; e-mail: [Vovna\\_Alex@ukr.net](mailto:Vovna_Alex@ukr.net); 58, Artyom street, Donetsk, 83001, Ukraine; phones: +380623045571; +380623010918; the department of electronic technics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Zori Anatolii Anatolievich** – the department of electronic technics; d.r of eng. sc.; head the department; professor.

**Kosarev Nikolay Pavlovich** – the department of electronic technics; associate professor.

УДК 004.93

**Е.А. Башков, С.А. Зори**

**РЕАЛИСТИЧНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ И СЦЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЪЕМНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ**

*Рассматривается исследование возможности синтеза реалистичных стереоскопических изображений сцен методом трассировки лучей, а также возможности их поддержки на параллельных архитектурах специализированных вычислительных систем. Разработана реализация предложенного способа стереосинтеза изображений сцен с использованием метода обратной трассировки лучей и анаглиф-постпреобразования на графических процессорах (платформа CUDA), экспериментально оценены временные характеристики процесса для различных характеристик сцен (количества объектов, источников освещения, аппроксимирующих граней, динамики, размера вычислительной сети и других). Экспериментальная проверка показала, что разработанный прототип системы решает задачу формирования изображений сцен малой и средней сложности в реальном времени.*

*Реалистичная визуализация; объемное отображение; стереоизображения; графический мультипроцессор.*