

## АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ПЫЛИ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В УГОЛЬНОЙ ШАХТЕ

**Вовна А.В., Хламов М.Г.**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

кафедра электронной техники

E-mail: Vovna\_Alex@ukr.net

### **Abstract**

*Vovna A.V., Khlamov M.G. Algorithm identification of influencing dust on exactness measuring of concentration methane in a coal mine. At construction of spectrometry infra-red gazanalyzator for determination concentration methane there is the problem of influencing of dust in a working measuring channel on the results of measuring in a coal mine, which successfully decides by the methods of indemnification by introduction of apparatus surplus.*

**Общая постановка проблемы.** В связи с применением электроэнергии в шахтах, опасных по выбросам угля, породы и газа, вопрос о газовой защите при выбросе приобретает первостепенное значение. Поскольку выброс угля, породы и газа — быстропротекающие явления, то аппаратура газовой защиты должна быть малоинерционной, успевающей отключать электроэнергию в забое или на участке при выбросе до появления взрывоопасной концентрации метана. В противном случае при повреждении выбросом электрических машин или кабелей не исключены взрывы газа и пыли.

С ростом глубины разработок увеличивается газодинамические проявления в рудничной атмосфере угольной шахты, что требует разработки новых и доработке существующих специальных быстродействующих методов и технических средств оперативного наблюдения и контроля концентрации метана в рудничной атмосфере угольных шахт. Это позволит учесть недостатки существующих газоанализаторов, и выйти на мировые требования разработки средств измерения концентрации газовых компонент подобного типа.

Имеется ряд существенных недостатков методов и средств контроля рудничной атмосферы шахты:

1. Не обеспечивается достаточное быстродействие при измерении концентрации метана, поэтому нет возможности оперативно предупредить или хотя бы снизить вероятность взрывоопасной ситуации, особенно при залповых выбросах метана и угольной пыли.

2. Для получения точности рабочего средства измерения в существующих системах используют средства пробоподготовки (фильтры для очистки газа от пыли), что значительно снижает быстродействие газоанализатора.

3. Не контролируются и не учитываются параметры рудничной атмосферы, а именно температура воздуха, давление, влажность, что значительно снижает показатели точности и быстродействие существующих средств измерения концентрации метана в атмосфере угольной шахты.

4. На участках шахтных выработок возникает необходимость получения дополнительной информации с целью предупреждения аварийных ситуаций на объектах в случае их возникновения, срочного выключения электроснабжения и устранения взрывоопасной ситуации.

Полученные результаты исследований [1] позволяют определить исходные данные для создания малоинерционной аппаратуры противогазовой защиты.

Величину установки по метану следует принимать в 2 раза меньше нижнего предела взрывоопасности метана — 2,5 %. Максимальное допустимое время срабатывания (инерционности) аппаратуры, определенное по верхней доверительной границе индивидуальных значений концентрации метана, составляет 0,7–0,75 с.

Анализ данных [1] показывает, что при внезапных выбросах угля и газа, возникших при технологическом процессе выемки угля и газа, отличном от взрывного, указанная концентрация метана в забое (2,5 %) будет появляться через 4,3 с после начала внезапного выброса. При этом скорость нарастания концентрации метана составляет 0,5 % в секунду.

**Постановка задачи исследования.** Объемная концентрация метана может быть практически мгновенно измерена бездисперсионным абсорбционным спектрометрическим газоанализатором [2]. Принципиальным есть конструкторское решение, реализующее методы построения измерителей, которые обеспечивают измерения среднего значения концентрации метана, по длине измерительной трассы.

При этом проблема влияния пыли в рабочем измерительном канале на результаты измерения решается методами компенсации путем введения аппаратурной избыточности.

Поток монохроматического излучения, проходя через пылегазовую среду, ослабляется в результате рассеивания и поглощения (абсорбции). Интенсивность рассеивания света зависит от размеров частиц, их концентрации, комплексного коэффициента преломления и угла рассеивания между направлениями падающего и рассеянного света.

В общем случае интенсивность света, рассеянного сферической частицей  $I_{рас}$ , может быть рассчитана по уравнению Ми [3]:

$$I_{рас} = \frac{\lambda^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot l^2} \cdot (i_1 + i_2),$$

где  $\lambda$  — длина световой волны;  $l$  — расстояние от точки наблюдения до частицы;  $i_1$  и  $i_2$  — интенсивность рассеянного света, поляризованного перпендикулярно  $i_1$  и параллельно  $i_2$  плоскости рассеяния.

Поток излучения, рассеянный частицей, состоит из двух некогерентных плоскополяризованных компонент  $i_1$  и  $i_2$ , плоскости, поляризации которых взаимно перпендикулярны. Суммарная интенсивность рассеянного света существенно зависит от параметра  $\varepsilon = 2 \cdot \pi \cdot r_c$  (где  $r_c$  — размер частицы).

В случае  $\varepsilon \ll 1$ , когда размеры частицы малы по сравнению с длиной волны,  $I_{рас}$  пропорционально  $r_c^6$ . В эту категорию входят ультрамикроскопические частицы размером до 0,1 мкм. Если  $\varepsilon \approx 1$ , размеры частицы соизмеримы с длиной волны,  $I_{рас}$  пропорционально  $r_c^n$ , где  $n = 2 \div 6$ . К этой категории относятся частицы, размером 0,1–1,0 мкм. Для частиц крупнее 1 мкм интегральная интенсивность рассеянного света пропорциональна  $r_c^2$ . В этом случае рассеяния света полидисперсной пылью происходит усреднение результатов. Светорассеивающие свойства системы относительно крупных частиц аналогичны светорассеивающим свойствам одной частицы. При этом частицы рассеивают свет некогерентно (независимо друг от друга), когда расстояние между ними больше длины волны падающего света.

Явление поглощение света описывается законом Бугера:

$$I_{np} = I_0 \cdot e^{-k \cdot l_1},$$

где  $I_{np}$  — интенсивность света, прошедшего через частицы пыли;  $I_0$  — интенсивность падающего на пыль света;  $k$  — коэффициент поглощения света;  $l_1$  — толщина поглощаемого слоя (длина трассы).

Поглощение света пылью в значительной мере зависит от дисперсного состава [4]. Когда размер частиц намного превышает длину волны, поглощение света пропорционально площади их поверхности. По мере приближения размера частиц к длине световой волны поглощение света единицей площади поверхности увеличивается. Когда размер частиц становится незначительным по сравнению с длиной волны, его поглощение единицей площади уменьшается почти до нуля.

**Решение задач и результаты исследований.** Для компенсации влияния рудничной пыли на результат измерения концентрации метана в измеритель введены два пространственных и в них по два частотных канала. Схема оптических каналов и сигналов в них, рассматриваемого метанометра, приведена на рис. 1.

В качестве источников инфракрасного излучения выбраны следующие светоизлучающие диоды:  $LED34$  с рабочей длиной волны  $\lambda_{LED34} = 3,4 \text{ мкм}$ , которая соответствует максимуму интенсивности спектра поглощения метана и  $LED27$  для реализации алгоритма компенсации возмущающих факторов в открытом оптическом канале ( $OK_1$ ) с длиной волны  $\lambda_{LED27} = 2,7 \text{ мкм}$ , при этой длине волны излучения контрольного светоизлучающего диода интенсивность спектральных линий поглощения метана практически равна нулю. Поток энергии от излучения LED поступает на объектив  $O_1$ , который формирует направленный поток излучения, который поступает на систему направляющих зеркал. Полупрозрачное зеркало ( $ППЗ_1$ ) разделяет поток излучения, одна часть его направляется в рабочий оптический канал с измеряемой концентрацией метана, другая часть потока в контрольный оптический канал ( $OK_2$ ), где находится инертный газ или азот, который в данном диапазоне длин волн не поглощает инфракрасное излучение. Поток, прошедший кюветы газоанализатора, поступает на фокусирующие объективы ( $O_2$  и  $O_3$ ), которые фокусируют параллельный направленный поток в точку, и поступают на фотоприемники (PD), в качестве фотоприемников используются фотодиоды  $PD36$ .

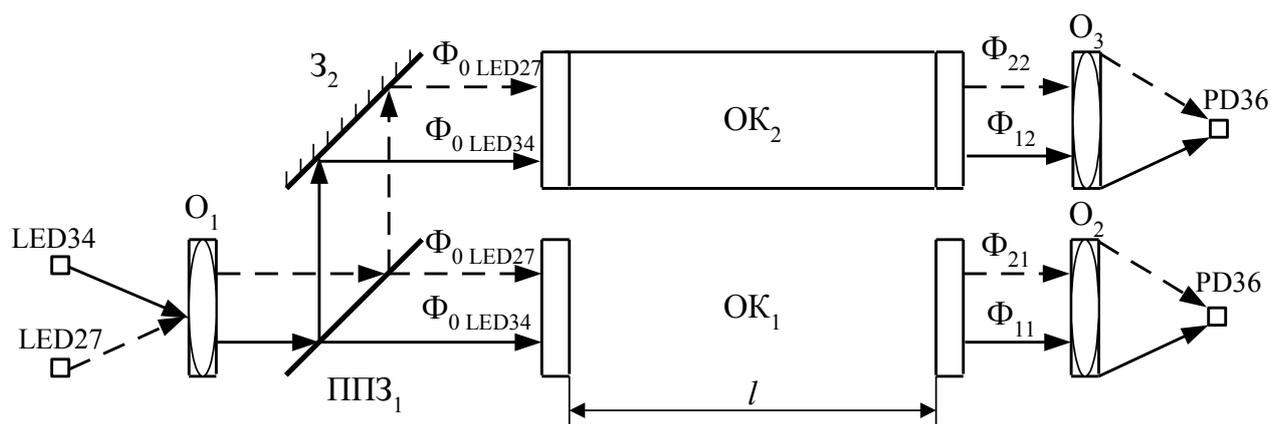


Рисунок 1 — Схема оптических каналов абсорбционного измерителя концентрации метана в рудничной атмосфере угольной шахты

Рассмотрены два алгоритма компенсации возмущений: алгоритм аддитивной и мультипликативной компенсации. В основу алгоритма мультипликативной компенсации положена последовательная модель влияния факторов приводящих к изменению мощности излучения в рабочем оптическом канале: поток излучения последовательно обрабатывается тремя

звеньями, учитывающими рассеяние излучения угольной пылью, поглощение метаном, пропускание излучения пленкой пыли на окнах рабочей измерительной кюветы оптического газоанализатора.

В основу алгоритма компенсации положена следующая модель влияния факторов приводящих к изменению мощности излучения в оптическом канале (см. рис. 2).



Рисунок 2 — Факторы, влияющие на изменение мощности излучения в оптическом канале газоанализатора

Рассеивание ( $D_P$ ) — рассеивание на пыли в оптическом канале; поглощение ( $D_{II}$ ) — поглощение метаном излучения; пропускание ( $D_{III}$ ) — пропускание излучения окнами каналов;  $\Phi_{вхОК}$  и  $\Phi_{выхОК}$  — входной и выходной поток оптических каналов.

Уравнения, описывающие влияние на мощность оптического сигнала всех факторов, моделируемых коэффициентами передачи соответствующих звеньев, и приводящих к изменению мощности излучения, для каждого канала и сигнала принимают вид:

Рабочий оптический канал — открытый измерительный канал  
 Сигнал основного измерительного частотного канала ( $LED34$ ):

$$\Phi_{11} = \Phi_{выхОК}(C_{CH4}, D_P, D_{III}) = \Phi_{0 LED34} \cdot e^{-D_P} \cdot e^{-D_{III}} \cdot e^{-D_P(C_{CH4})},$$

где  $C_{CH4}$  — объемная концентрация метана по длине выработки.

Сигнал сравнительного частотного канала ( $LED27$ ):

$$\Phi_{21} = \Phi_{выхОК}(C_{CH4}, D_P, D_{III}) = \Phi_{0 LED27} \cdot e^{-D_P} \cdot e^{-D_{III}}.$$

Контрольный оптический канал заполнен не поглощающей газовой смесью и изолирован от рудничной атмосферы, поэтому возмущающие факторы, приведенные на рис. 2, не влияют на оптические сигналы.

Сигнал контрольного измерительного частотного канала ( $LED34$ )

$$\Phi_{12} = \Phi_{выхОК} = \Phi_{0 LED34}.$$

Сигнал сравнительного частотного канала ( $LED27$ )

$$\Phi_{22} = \Phi_{выхОК} = \Phi_{0 LED27}.$$

При реализации алгоритма мультипликативной компенсации влияния пыли на точность измерения концентрации метана в угольной шахте необходимо в алгоритме реализовать следующие вычисления:

$$\frac{\Phi_{11}}{\Phi_{12}} = \frac{\Phi_{0 LED34} \cdot e^{-D_P} \cdot e^{-D_{III}} \cdot e^{-D_P(C_{CH4})}}{\Phi_{0 LED34}} = e^{-D_P(C_{CH4})}.$$

$$\frac{\Phi_{21}}{\Phi_{22}} = \frac{\Phi_{0 LED27} \cdot e^{-D_P} \cdot e^{-D_{III}}}{\Phi_{0 LED27}}$$

При реализации алгоритма аддитивной компенсации влияния пыли на точность измерения концентрации метана в угольной шахте, поток лучистой энергии  $\Phi_{11}$  проходит через рабочий открытый оптический канал, состоящий из: определяемого компонента анализируемой газовой смеси (поглощение метаном излучения); не поглощаемого компонента; мешающего компонента (рассеивание потока излучения на угольной пыли и пропускание излучения окнами кюветы) и выражается зависимостью:

$$\Phi_{11} = \Phi_{0 \text{ LED34}} - \Delta\Phi_P - \Delta\Phi_{\Pi} - \Delta\Phi_{\Pi P},$$

где  $\Phi_{0 \text{ LED34}}$  — поток лучистой энергии на входе оптического канала при излучении рабочим светоизлучающим диодом (LED);  $\Delta\Phi_{\Pi}$  — поток энергии, поглощенный компонентом смеси (объемной концентрацией метана);  $\Delta\Phi_P$  и  $\Delta\Phi_{\Pi P}$  — потери потока излучения за счет мешающих компонент, а именно рассеивание на пыли в оптическом канале и пропускание излучения окнами кювет.

Поток лучистой энергии  $\Phi_{12}$  проходит через контрольную кювету с не поглощающей компонентой анализируемой смеси с воздухом и равен:

$$\Phi_{12} = \Phi_{0 \text{ LED34}}.$$

Поток лучистой энергии  $\Phi_{21}$  проходит через рабочий открытый оптический канал, состоящий из не поглощаемого компонента; мешающего компонента (рассеивание потока излучения на угольной пыли и пропускание излучения окнами кюветы) и выражается зависимостью:

$$\Phi_{21} = \Phi_{0 \text{ LED27}} - \Delta\Phi_P - \Delta\Phi_{\Pi P},$$

где  $\Phi_{0 \text{ LED27}}$  — поток лучистой энергии на входе оптического канала при излучении рабочим светоизлучающим диодом (LED).

Поток лучистой энергии  $\Phi_{22}$  проходит через контрольную кювету с не поглощающей компонентой анализируемой смеси с воздухом и равен:

$$\Phi_{22} = \Phi_{0 \text{ LED27}}.$$

Все выше перечисленные потоки, пройдя чрез кюветы и претерпев изменения, падают на фотоприемники ( $PD36$ ). Для выделения информационной составляющей  $\Delta\Phi_{\Pi}$  необходимо в алгоритме реализовать следующие вычисления:

$$\Phi_{11} - \Phi_{12} = \Phi_{0 \text{ LED34}} - \Delta\Phi_P - \Delta\Phi_{\Pi} - \Delta\Phi_{\Pi P} - \Phi_{0 \text{ LED34}} = \varphi_1;$$

$$\Phi_{21} - \Phi_{22} = \Phi_{0 \text{ LED27}} - \Delta\Phi_P - \Delta\Phi_{\Pi P} - \Phi_{0 \text{ LED27}} = \varphi_2;$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \Delta\Phi_P - \Delta\Phi_{\Pi P} - (-\Delta\Phi_P - \Delta\Phi_{\Pi} - \Delta\Phi_{\Pi P}) = \Delta\Phi_{\Pi}.$$

Для оценки эффективности отмеченных алгоритмов компенсации и обоснования основных параметров измерителя концентрации метана разработана имитационная модель его функционирования в условиях стационарного режима работы выработки угольной шахты.

Моделью учтены неоднородный характер распределения концентрации метана и угольной пыли в различных режимах работы горной выработки. Измеряемая величина (концентрация метана) и возмущающие факторы (концентрация пыли) определялись как инте-

грал от распределения этих параметров вдоль трассы оптического луча с учетом изменчивости параметров во времени. В рабочем оптическом канале поля концентраций метана и угольной пыли полагались локально однородными изотропными и последовательно обновляемыми. При моделировании концентрации метана и пыли в рабочем оптическом канале (интегральные распределения вдоль трассы оптического луча) были представлены цифровыми разностными моделями случайных стационарных процессов. Неоднородный характер полей учитывался изменениями их параметров при изменении режима работы горной выработки угольной шахты.

Моделирование выполнено в два этапа. На первом этапе осуществлена имитация настройки и градуировки измерителя. Разработана рациональная схема настройки устройства, предусматривающая учет неравной чувствительности фотоприемников пространственных каналов к частотам основного ( $\lambda_{LED34} = 3,4 \text{ мкм}$ ) и контрольного ( $\lambda_{LED27} = 2,7 \text{ мкм}$ ) каналов и их неидентичность. Так же учтены: несимметрия показателей геометрической оптики каналов, обусловленная различиями в длинах оптических путей сигналов; различные значения коэффициентов ввода излучения в оптические элементы системы; конечная точность настройки светоделителя (полупрозрачное зеркало  $ППЗ_1$ ).

Настройка измерителя осуществляется путем перемножения значений сигналов всех каналов на корректирующие коэффициенты, обеспечивающие равенство сигналов всех каналов при устранении из рабочего канала всех факторов ведущих к уменьшению потока излучения (исключения влияния пыли и метана на величину потока излучения путем установки на место рабочего канала  $OK_1$  кюветы аналогичной установленной в сравнительном канале  $OK_2$ ). Имитация градуировки выполнена при подаче на вход измерителя испытательного одиннадцатилетнего сигнала (установки на место  $OK_1$  кювет с эталонной концентрацией метана в диапазоне  $(0,5)\%$ ). Получена градуировочная характеристика измерителя, которая аппроксимирована степенным полиномом второй степени. Приведенное значение алгоритмической погрешности не превышает  $0,2\%$ .

Имитация работы измерителя концентрации метана проводилась с целью проверить на математических моделях его функционирование. Комплекс возмущающих факторов, воздействующих на процесс измерения, включал: рассеяние потока излучения в рабочем канале пылью, присутствующей в атмосфере угольной шахты, отложение пыли на окнах рабочей кюветы (рабочего оптического канала), а также деградацию оптоэлектронных полупроводниковых приборов, точности задания параметров алгоритма компенсации.

В результате моделирования получены следующие результаты.

Алгоритм мультипликативной компенсации допускает в 2...3 раза больший динамический диапазон возмущений, чем аддитивной. Предельными значениями отношения сигнал / помеха в оптическом канале для этих алгоритмов оказались: для алгоритма аддитивной компенсации — 1...1,5; для алгоритма мультипликативной компенсации 0,2...0,3. При компенсации шумов высокого уровня (высокая концентрация угольной пыли в оптическом канале и высокая толщина пленки пыли на окнах рабочей кюветы) решающим фактором, обеспечивающим эффективную компенсацию мультипликативного алгоритма, оказался — разрядность АЦП. С увеличением разрядности АЦП до 14 допустимое отношение сигнал / помеха для этого алгоритма снижается до 0,1. Последнее обстоятельство позволяет рекомендовать использование алгоритма мультипликативной компенсации при повышенной концентрации пыли в угольных шахтах.

Алгоритм мультипликативной компенсации оказался весьма критичным к точности определения коэффициентов, используемых в этом алгоритме. Эффективность этого алгоритма соответствует описанному, если точность представления коэффициентов в алгоритме не хуже  $0,05\%$ . Воздействия возмущений на оптический сигнал,

имеющие место в оптическом канале, подобны воздействию на сигнал мультипликативной помехи в радиоканалах. Существенным отличием рассматриваемого случая от радиоканалов является формирование самого сигнала в оптическом канале процессом поглощения излучения метаном.

Изменения мощности излучения электролюминесцентных источников не вызывают каких либо изменений результатов измерений. Полученные данные справедливы для всего диапазона изменения концентрации метана. При этом с компенсацией изменений в одинаковой степени успешно справляются, как мультипликативный, так и аддитивный алгоритмы.

Деградация оптоэлектронных полупроводниковых приборов снижает мощность выходного излучения. Несимметричный режим работы этих устройств ведет к снижению метрологических характеристик измерительных устройств. Наличие алгоритма компенсации в измерителе концентрации метана позволяет устранить проблему несимметрии. Отличия мощностей излучения электролюминесцентных источников до 50 % не вызывает изменения результатов измерений.

Полученные результаты моделирования позволили установить структуру спектрометрического абсорбционного измерителя концентрации метана, которая должна содержать два пространственных и в них по два частотных канала. Выходы пространственных каналов подключаются к входам фотоэлектрических преобразователей. Выделение частотных каналов обеспечивается мультиплексированием выходных сигналов электролюминесцентных источников излучения и синхронно с ними выходных сигналов фотоэлектрических преобразователей. Сигналы всех каналов после аналого-цифрового преобразования вводятся в микропроцессор, где в программном режиме выполняется компенсация, масштабирование и коррекция результатов измерений.

#### **Выводы.**

1. На основании проведенных исследований предложено многоканальное средство измерения, с помощью которого компенсируется влияние рудничной пыли и колебания параметров рудничной атмосферы на результат измерения объемной концентрации метана в горной выработке угольной шахты.

2. Предлагается установить вдоль шахтной выработки стационарные спектрометрические газоанализаторы для первичного оперативного контроля концентрации метана. С помощью оптико-электрических средств, увеличив объем контролируемого пространства, получив значение объемной концентрации метана за существенно меньшее время.

3. Применение предложенных методов компенсации в газоаналитических измерителях, построенных на современной микроэлектронной и оптической базе, обеспечивает создание спектрометрических инфракрасных газоанализаторов высокого быстродействия и точности.

#### **Литература**

1. Волошин Н.Е. Внезапные выбросы и способы борьбы с ними в угольных шахтах. — Киев.: Техника, 1985. — 127 с.
2. Вовна А.В., Рак А.И., Хламов М.Г. Математическая модель оптического канала абсорбционного измерителя концентрации оксида углерода инфракрасного газоанализатора // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматика. Випуск 58. — Донецьк: Вид-во ДонНТУ, 2003. — С. 27–35.
3. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / Петунин П.М., Гродель Г.С., Жилев Н.И. и др. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1981. — 271 с.
4. Кудряшов В.В. Оптический методы определения запыленности воздуха на угольных шахтах. // В кн.: Научно-исследовательские работы в угольной промышленности. — М.: Углетехиздат, 1959. — С. 107–120.