

Раздел III. Информационные системы, приборы и устройства

УДК 543.421:621.38

А.В. Вовна, А.А. Зори

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ДЛЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Разработан и исследован экспериментальный образец измерителя концентрации метана для угольных шахт. При проведении лабораторных испытаний в условиях лаборатории аэрогазовой защиты угольной шахты установлены чувствительность, уровень шума и значения основной абсолютной погрешности измерения концентрации метана. Чувствительность по метану измерительного канала измерителя составляет не менее $0,17 \text{ V}^{\text{об.}\%}$ в диапазоне изменения от 0 до $2,5^{\text{об.}\%}$. Амплитудное значение шумовой составляющей выходных напряжений не превышает $\pm 12,5 \text{ мВ}$, что с доверительной вероятностью $P=0,95$ соответствует среднему квадратичному значению $\pm 6,3 \text{ мВ}$. Установлено, что значение основной абсолютной погрешности измерения концентрации метана в указанном диапазоне изменения составляет не более $\pm 0,04^{\text{об.}\%}$ при требуемой основной абсолютной погрешности измерения, указанной в технических характеристиках на разработку измерителя не более $\pm 0,2^{\text{об.}\%}$. Определена чувствительность по метану компенсационного канала пыли измерителя, которая составляет $0,024 \text{ V}^{\text{об.}\%}$ в диапазоне изменения от 0 до $2,5^{\text{об.}\%}$. Значение основной абсолютной погрешности измерения концентрации метана с учетом компенсации пыли и запыленности оптики измерительных каналов составляет не более $\pm 0,043^{\text{об.}\%}$ при требуемом значении не более $\pm 0,2^{\text{об.}\%}$.

Измеритель; испытания; метан; компенсация; метрологические характеристики.

A.V. Vovna, A.A. Zori

DEVELOPMENT AND RESEARCH EXPERIMENTAL SAMPLES OF THE METHANE CONCENTRATION METER FOR COAL MINES

The experimental sample of methane concentration meter for coal mines was developed and studied. During laboratory tests in the laboratory aerogas protection were determined sensitivity, noise level and value of basic absolute error of methane concentration measurement. Sensitivity to methane measuring channel meter is not less than $0.17 \text{ V}^{\text{vol.}\%}$ in the changing range from 0 to about $2.5^{\text{vol.}\%}$. Amplitude value of the noise component of the output voltage does not exceed $\pm 12.5 \text{ mV}$, which corresponds to a confidence level of $P=0.95$ of the mean square value of $\pm 6.3 \text{ mV}$. It has been established that value of the methane concentration measurement basic absolute error in the specified variation range is not more than $\pm 0.04^{\text{vol.}\%}$ with the required measurement absolute error which specified in the technical specifications for the meter development is no more than $\pm 0.2^{\text{vol.}\%}$. The dust compensation channel sensitivity of methane meter is $0.024 \text{ V}^{\text{vol.}\%}$ in the changing range from 0 to $2.5^{\text{vol.}\%}$ was defined. The basic absolute error value of methane concentration measurement with the dust compensation and the dust optics measuring channels value is not more than about $\pm 0.043^{\text{vol.}\%}$ at required value which is not more than $\pm 0.2^{\text{vol.}\%}$.

Measurer; development; methane; compensation; metrological characteristics.

Общая постановка проблемы. Одним из приоритетных направлений развития современных средств измерительного контроля концентрации газовых компонент является усовершенствование и разработка новых оптических измерителей для условий угольных шахт и промышленных предприятий. Увеличение быстродействия измерителей при обеспечении требуемых метрологических характеристик в условиях воздействия комплекса дестабилизирующих факторов является актуальной проблемой.

Постановка задач исследований. Целью работы является определение характеристик преобразования по метану экспериментального образца измерителя и его основных метрологических характеристик. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести лабораторные испытания образца измерителя концентрации метана в условиях лаборатории аэрогазовой защиты угольной шахты.
2. Установить характеристики преобразования по метану измерительного и компенсационного каналов измерителя.
3. Оценить основные метрологические характеристики экспериментального образца измерителя.

Решение задач и результаты исследований. Государственным высшим учебным заведением «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк, Украина) совместно с частной компанией «Дейта Экспресс» (г. Донецк, Украина) разработан и создан экспериментальный образец измерителя концентрации метана, состоящий из следующих устройств:

1. Измерительная оптическая кювета *Lms34LED–Lms36PD* [1];
2. Компенсационная оптическая кювета *Lms38LED–Lms43PD* [1];
3. Аналоговые измерительные каналы, которые включают в себя:
 - 3.1. Драйвер для светодиода
 - 3.1.1. Ток накачки светодиодов, А
 - ♦ для измерительной ячейки *Lms34LED – Lms36PD* 1,0;
 - ♦ для компенсационной ячейки *Lms38LED – Lms43PD* 0,77;
 - 3.1.2. Длительность импульса тока накачки, мкс 20;
 - 3.1.3. Частота импульсной последовательности, Гц 500.
 - 3.2. Синхронный детектор
 - 3.2.1. Коэффициент усиления по напряжению 3;
 - 3.2.2. Усреднение по времени, мкс 100;
 - 3.3. Нормирующий усилитель с аналоговой компенсацией температурного дрейфа светодиодов *Lms34LED* и *Lms38LED* [2].
4. Четырехканальный 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь с записью данных в персональный компьютер через USB-порт (*Arduino DUE*).

Структурная схема экспериментального образца измерителя концентрации метана приведена на рис. 1, где обозначено:

ИТ_{ИК} и *ИТ_{КК}* – источники тока для питания светодиодов измерительного (*Lms34LED*) и компенсационного (*Lms38LED*) каналов;

ПУ₃₆ и *ПУ₄₃* – предварительные усилители выходных сигналов фотодиодов измерительного (*Lms36PD*) и компенсационного (*Lms43PD*) каналов;

ТЕСТ Т – блоки измерения и преобразования падений напряжений на светодиодах, величины которых пропорциональны изменению температуры;

СД – синхронные детекторы; *НУ* – нормирующие усилители с аналоговой компенсацией температурного дрейфа светодиодов; *АК* – аналоговый коммутатор; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь; *МК* – микроконтроллер; *USB* – протокол передачи информации в персональный компьютер (*ПК*).

В состав измерительной и компенсационной оптических кювет входят светодиоды (*Lms34LED* и *Lms38LED*), фотодиоды (*Lms36PD* и *Lms43PD*) и предварительные усилители *ПУ36* и *ПУ43* выходных импульсных токовых сигналов фотодиодов.

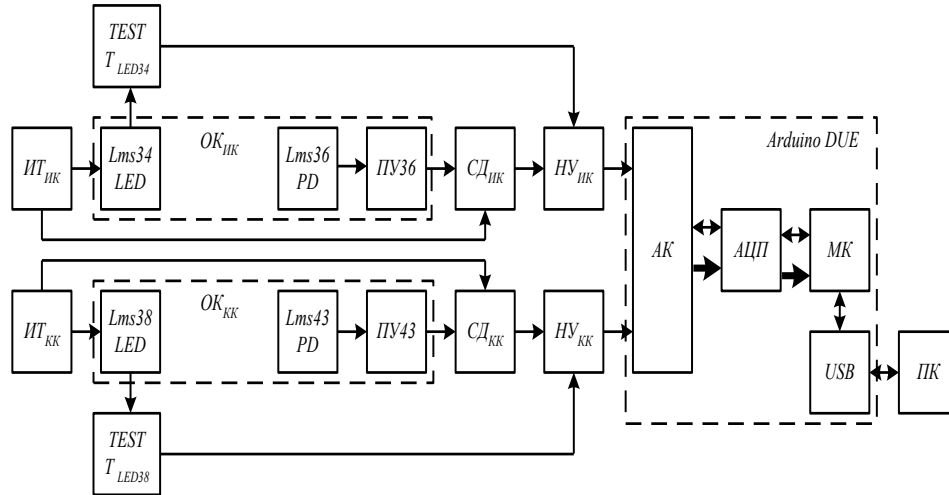


Рис. 1. Структурная схема экспериментального образца измерителя концентрации метана

Опрос каналов осуществляется с периодом 10 мс. Канал находится во включенном состоянии не более 1 мс. Массивы напряжений по каждому из каналов накапливаются в памяти. Длина массива составляет 10 значений. Определяются средние значения результатов измерений выходных напряжений по формулам

$$\overline{U_{ИК_j}} = \frac{1}{N_{ИК}} \cdot \sum_{i=0}^{N_{ИК}=10-1} u_{ИК_{i+j,5}}; \quad \overline{U_{КК_j}} = \frac{1}{N_{КК}} \cdot \sum_{i=0}^{N_{КК}=10-1} u_{КК_{i+j,5}},$$

где $u_{ИК_i}$, $u_{КК_i}$ – массивы результатов наблюдений мгновенных значений выходных напряжений ИК и КК; $N_{ИК}$, $N_{КК}$ – количество точек для определения средних значений результатов измерений выходных напряжений ИК и КК; $\overline{U_{ИК_j}}$, $\overline{U_{КК_j}}$ – массивы средних значений результатов измерений выходных напряжений ИК и КК.

Микроконтроллер выполняет анализ результатов измерений выходных напряжений ИК и КК. Если их значения $\overline{U_{ИК_j}}$ и $\overline{U_{КК_j}}$ превышают 3,3 В, то формируется сигнал о проведении технического обслуживания измерителя (запыление оптических компонент измерителя превышает допустимый уровень) в систему аэрогазовой защиты угольных шахт. В противном случае выполняется алгоритм компенсации запыленности оптических измерительных каналов путем вычитания результатов измерений выходных напряжений ИК и КК по формуле [3–5]:

$$\overline{\Delta U_j} = \overline{U_{ИК_j}} - K \left(\overline{U_{КК_j}} - U_{CM} \right),$$

где $\overline{\Delta U_j}$ – массив результирующего напряжения измерителя, по значению которого определяют измеряемую концентрацию газа; K – масштабный коэффициент KK , величина которого составляет 1 (значение можно изменить в аналоговом KK); U_{CM} – напряжение смещения KK , величина которого составляет 0 В (значение можно изменить в аналоговом KK).

Для решения поставленных задач проведены лабораторные испытания экспериментального образца измерителя концентрации метана, которые выполнены в производственных условиях лаборатории аэрогазовой защиты шахты им. М.И. Калинина (г. Донецк, Украина). Для определения измеряемой концентрации метана использовалась поверочная установка КИМ, предназначенная для испытания и осуществления поверки основных погрешностей измерения концентрации метана. Установка имеет следующие основные метрологические характеристики:

- ◆ диапазон аттестации объемной доли метана в смесях, % от 0 до 2,5;
- ◆ предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения объемной доли метана, % в диапазоне от 0 до 2,0 % $\pm 0,06$; более 2,00 % $\pm 0,1$;
- ◆ объемная доля метана, при которой включается световая и звуковая сигнализация, % $2,5 \pm 0,1$;
- ◆ вариация показаний, по объемной доле метана, % 0,06.

Характеристики преобразования по метану измерительного ($ИК$) и компенсационного ($КК$) каналов экспериментального образца определялись путем измерения среднего значения выходных напряжений при изменении концентрации метана в диапазоне от 0 до 2,5 об.%. На рис. 2 приведены экспериментально определенные характеристики преобразования по метану измерительного канала, где обозначено: \times – Серия № 1; \circ – Серия № 2; ——— – результаты аппроксимации характеристики преобразования уравнением вида

$$U_{ИК} = U_{ИК0} \left(1 - e^{-k_{ИК} \cdot C_{CH_4}} \right), \quad (1)$$

где $k_{ИК} = 0,061 \left(\text{об.}\% \right)^{-1}$; $U_{ИК0} = 3,0$ В – рассчитанные коэффициенты аппроксимации характеристики преобразования уравнением (1).

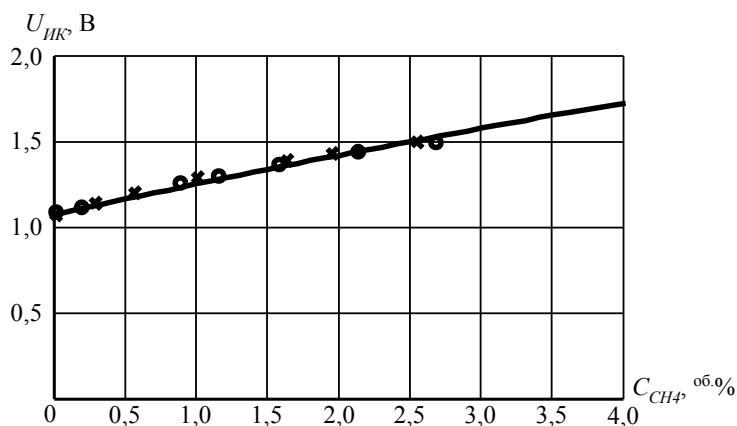


Рис. 2. Характеристика преобразования по метану ИК при изменении C_{CH_4} в диапазоне от 0 до 4,0 об.%

При линейной аппроксимации характеристики преобразования измерителя чувствительность по метану $ИК$ в диапазоне измерения от 0 до 2,5^{об.%} составляет

$$S_{CH4}^{ИК} = \frac{\Delta U_{ИК}}{\Delta C_{CH4}} = \frac{1,50 - 1,07}{2,54 - 0,00} = 0,17 \frac{В}{об. \%}$$

Для оценки значения основной погрешности измерения концентрации метана проведены лабораторные испытания, в результате которых определено амплитудное значение шумовой составляющей выходного напряжения $ИК$. Данное значение не превышало $\pm 12,5$ мВ, что с доверительной вероятностью $P = 0,95$ соответствует среднему квадратичному значению $U_{ш} = \pm 12,5 / 2 = \pm 6,3$ мВ. При этом среднее квадратичное значение основной абсолютной погрешности результатов измерения концентрации метана в диапазоне изменения от 0 до 2,5^{об.%} не превышает значения

$$\Delta_{CH4} = \frac{U_{ш}}{S_{CH4}^{ИК}} = \frac{\pm 6,3 \cdot 10^{-3}}{0,17} = \pm 0,04 \text{ об. \%},$$

что в 5 раз меньше требуемого значения основной абсолютной погрешности измерения концентрации метана, указанной в технических характеристиках на разработку измерителя (не более $\pm 0,2$ ^{об.%}) [6].

На рис. 3 приведены экспериментально определенные характеристики преобразования по метану компенсационного канала пыли измерителя, где обозначено: \times – Серия № 1; \circ – Серия № 2; ———— – результаты аппроксимации характеристики преобразования уравнением вида

$$U_{KK} = U_{KK0} \cdot (1 - e^{-k_{KK} \cdot C_{CH4}}), \quad (2)$$

где $k_{KK} = 0,0081 \text{ (об. \%)}^{-1}$; $U_{KK0} = 3,0$ В – расчетные коэффициенты аппроксимации характеристики преобразования уравнением (2).

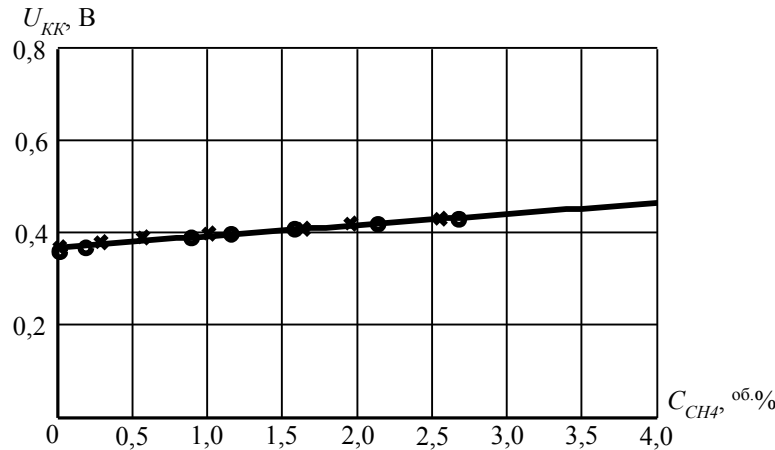


Рис. 3. Характеристика преобразования по метану $КК$ при изменении C_{CH4} в диапазоне от 0 до 4,0^{об.%}

При линейной аппроксимации характеристики преобразования измерителя чувствительность по метану $КК$ в диапазоне изменения от 0 до 2,5^{об.%} составляет

$$S_{CH4}^{КК} = \frac{\Delta U_{КК}}{\Delta C_{CH4}} = \frac{0,43 - 0,37}{2,54 - 0,00} = 0,024 \frac{В}{об. \%}$$

Аналогично измерительному каналу определено амплитудное значение шумовой составляющей выходного напряжения KK , которое не превышает ± 10 мВ, что с доверительной вероятностью $P = 0,95$ соответствует среднему квадратичному значению $U_{ш} = \pm 5,0$ мВ.

Отношение чувствительностей выходных напряжений измерительного канала к компенсационному от изменения концентрации метана в диапазоне от 0 до 2,5 об.% составляет

$$\delta S = \frac{S_{CH_4}^{IK}}{S_{CH_4}^{KK}} = \frac{0,17}{0,024} = 7,1,$$

что практически достаточно для компенсации влияния пыли в оптических каналах и запыленности оптоэлектронных компонент измерителя концентрации метана. С учетом компенсации запыленности значение чувствительности измерителя к изменению концентрации метана в диапазоне от 0 до 2,5 об.% составит

$$\Delta S = S_{CH_4}^{IK} - S_{CH_4}^{KK} = 0,17 - 0,024 = 0,146 \frac{В}{об. \%}.$$

В экспериментальном образце измерителя уменьшение чувствительности по метану за счет компенсации запыленности составило 15 %, что не столь существенно. При этом значение основной абсолютной погрешности измерения концентрации метана в диапазоне изменения от 0 до 2,5 об.% составляет не более:

$$\Delta_{CH_4} = \frac{U_{ш}}{\Delta S} = \frac{\pm 6,3 \cdot 10^{-3}}{0,146} = \pm 0,043 \text{ об. \%},$$

что в 4,6 раза меньше требуемого значения основной абсолютной погрешности измерения концентрации метана, указанной в технических характеристиках на разработку измерителя (не более $\pm 0,2$ об.%) [6].

Выводы:

1. Разработан и исследован экспериментальный образец измерителя концентрации метана для угольных шахт. При проведении лабораторных испытаний в условиях лаборатории аэрогазовой защиты угольной шахты установлены, что:

- ◆ чувствительность по метану измерительного канала образца измерителя составляет не менее 0,17 В/об.% в диапазоне изменения от 0 до 2,5 об.%;
- ◆ амплитудное значение шумовой составляющей выходных напряжений не превышает $\pm 12,5$ мВ, что с доверительной вероятностью $P = 0,95$ соответствует среднему квадратичному значению $\pm 6,3$ мВ;
- ◆ значение основной абсолютной погрешности измерения концентрации метана в данном диапазоне изменения составляет не более $\pm 0,04$ об.%, при значении, требуемом по техническим характеристикам на разработку измерителя, не более $\pm 0,2$ об.%.

2. Чувствительность по метану компенсационного канала измерителя составляет 0,024 В/об.% в диапазоне измерения от 0 до 2,5 об.%. Отношение чувствительностей выходных напряжений измерительного канала к компенсационному составляет более 7, что практически достаточно для компенсации влияния пыли и запыленности оптических каналов на показания измерителя концентрации метана.

3. Установлено, что уменьшение чувствительности измерителя концентрации метана за счет компенсации запыленности оптоэлектронных компонент измерителя составило порядка 15 %. При этом ее результирующее значение составило 0,146 В/об.% по сравнению со значением чувствительности 0,17 В/об.% без компенсации пыли в оптических каналах измерителя.

4. Определено значение основной абсолютной погрешности измерения концентрации метана с учетом компенсации пыли и запыленности каналов, которое составило не более $\pm 0,043$ ^{об.}% при требуемом значении не более $\pm 0,2$ ^{об.}%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. LED Microsensor NT [Электронный ресурс] / Mid-infrared LED-PD optopairs. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://ru.lmsnt.com>. – Дата доступа: февраль 2014. – Загл. с экрана.
2. *Вовна А.В., Зори А.А.* Способ компенсации температурного дрейфа оптического измерителя концентрации газа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 165-170.
3. *Вовна О.В.* Розробка методу компенсації вугільного пилу для інфрачервоного вимірювача концентрації метану // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк, 2010. – Вип. 19 (171). – С. 41-47.
4. Пат. 91795 С2. Україна, МПК G 01 N 21/35. Спосіб вимірювання концентрації метану в рудниковій атмосфері / *О.В. Вовна, А.А. Зорі, В.Д. Коренев, М.Г. Хламов*; Державний вищий навчальний заклад «Донецькій національний технічний університет» (Україна). № а200906379; Заявл. 19.06.2009; опубл. 25.08.2010. Бюл. № 8.
5. Пат. 92564 С2. Україна, МПК G 01 N 21/35. Пристрій для вимірювання концентрації метану в рудничній атмосфері / *О.В. Вовна, А.А. Зорі, В.Д. Коренев, М.Г. Хламов*; Державний вищий навчальний заклад «Донецькій національний технічний університет» (Україна). № а200909360; Заявл. 11.09.2009; Опубл. 10.11.2010. Бюл. № 21.
6. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания: ДСТУ ГОСТ 24032:2009. – [Действующий от 2009-02-01]. – Киев: Держспоживстандарт, 2009. – 24 с.

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

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

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

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

Zori Anatolii Anatolievich – the department of electronic technics; the head of department; dr. of eng. sc.; professor.