

УДК 543.421:621.38

А.В. Вовна¹ (канд. техн. наук, доц.), **А.А. Зори¹** (д-р техн. наук, проф.)
И.Я. Лизан² (канд. техн. наук)

- 1) ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
кафедра электронной техники
 - 2) Учебно-научный профессионально-педагогический институт УИПА, г. Артемовск
кафедра электромеханических систем
- E-mail: Vovna_Alex@ukr.net, zori@kita.dgtu.donetsk.ua

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА С АППАРАТНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Разработан и исследован макетный образец быстродействующего оптико-абсорбционного измерителя концентрации метана для условий угольных шахт. Установлены характеристики преобразования, чувствительность и метрологические характеристики измерителя. Разработан и реализован способ компенсации температурного дрейфа измерителя концентрации газа, в котором в качестве термочувствительного элемента предложено использовать светоизлучающий диод. Аппаратная реализация разработанного способа позволила оценить его эффективность: величина дополнительной погрешности измерений концентрации метана обусловленной изменением температуры, составила не более $\pm 0,1$ об.%, что в 4 раза меньше требуемой.

Ключевые слова: измеритель, макетный образец, испытания, точность, температура.

Общая постановка проблемы

Для предупреждения взрывоопасных ситуаций на промышленных предприятиях горно-металлургического комплекса необходимо детальное изучение изменения состава газовой смеси в атмосфере рабочей зоны. Наличие агрессивной среды и большого количества факторов, влияющих на результаты измерений (температура, давление, влажность, запыленность и т.д.), не позволило до настоящего времени создать газоаналитические измерители с требуемыми показателями быстродействия, точности и метрологической надежности. Поэтому разработка и внедрение экспериментальных образцов измерителей для контроля в реальном масштабе времени концентрации газовых компонентов в атмосфере промышленных предприятий является актуальной.

Постановка задач исследования

Целью работы является усовершенствование измерителей концентрации газов на базе оптико-абсорбционного метода контроля путем разработки способа компенсации изменения температуры на результаты измерений концентрации метана в рудничной атмосфере угольных шахт и его аппаратной реализации.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- разработать макетный образец оптического измерителя концентрации метана;
- провести лабораторные испытания измерителя;
- разработать способ аппаратной компенсации изменения температуры;
- оценить эффективность разработанного способа температурной компенсации и поставить требования к разработке опытного образца измерителя.

Результаты разработки и исследований

При разработке макетного образца быстродействующего оптического измерителя концентрации метана возникла задача повышения точности измерений путем компенсации его температурного дрейфа. Проведен анализ существующих способов компенсации температуры, который показал, что наиболее простым является способ, основанный на использовании дополнительного компенсационного канала. Выходной сигнал данного канала содержит только информацию об изменении компенсируемого дестабилизирующего фактора – температуры. Выходные сигналы измерительного и компенсационного каналов поступают на дифференциальную схему с последующим вычитанием и масштабированием полученной информации об измеряемой концентрации газа. При схемотехнической реализации данного способа получено, что дополнительная погрешность от изменения температуры окружающей среды не превышает $\pm 0,2$ об.%, что в 2 раза меньше требований [1] к данному измерителю. Однако использование данного способа существенно увеличивает как сложность схемотехнического решения, так и стоимость измерительного преобразователя, практически вдвое. Кроме того, разброс характеристик и параметров оптоэлектронных компонент измерителя от влияния температуры существенно зависит от конкретного диода в партии, что не позволяет получить эффективную температурную компенсацию.

Второй способ компенсации температуры заключается во введении термочувствительного элемента в схему измерителя. Информация об изменении температуры окружающей среды преобразовывается в электрический сигнал с последующим масштабированием и вычитанием из сигнала основного измерительного канала по дифференциальной схеме. Реализация данного способа также затруднена из-за существенного разброса характеристик оптоэлектронных компонент измерителя, а также с трудностями последующего подбора необходимых температурных коэффициентов компенсационного канала, что также требует индивидуальной градуировки измерителя по температуре.

Авторами предложено в качестве термочувствительного элемента использовать один из оптоэлектронных компонентов измерителя. При этом компенсация температурного дрейфа будет наиболее результативной и не требует индивидуальной градуировки по температуре каждого измерительного канала в отдельности. Как показывают теоретические модели [2] и экспериментальные исследования [3, 4] разработанного макетного образца измерителя, основной вклад в температурную нестабильность его выходного сигнала оказывает температурный дрейф светоизлучающего диода (СИД). Изменение характеристик и параметров фотодиода (ФД) от температуры вносит существенно меньший вклад в общую температурную нестабильность выходного сигнала измерительного канала, так как ФД эксплуатируется в фотогальваническом режиме включения. Отличительной особенностью работы ФД в этом режиме является существенно меньшая зависимость его тока от изменения температуры окружающей среды. Температурный дрейф аналоговых микросхем измерителя также незначителен по сравнению с дрейфом напряжения СИД.

Структурная схема разработанного макетного образца измерителя концентрации метана с аппаратной компенсацией температуры приведена на рис. 1. В качестве чувствительного элемента измерительного канала используется оптронная пара (СИД типа LED34 и ФД типа PD36) и открытый оптический канал (ОК). Питание СИД осуществляет от источника тока (ИТ) с заземленной нагрузкой. Источник тока обеспечивает импульсный ток накачки СИД с амплитудой от 0,4 до 1,2 А, длительность импульса 20 мкс с частотой прямоугольных импульсов 500 Гц и скважностью 100. ФД работает в фотогальваническом режиме, при этом величина тока протекающего через ФД пропорциональна концентрации метана в ОК. Информационный сигнал тока ФД поступает на предварительный усилитель (ПУ), который преобразовывает его в сигнал напряжения и усиливает. При этом амплитуда выходных импульсов напряжения ПУ изменяется от 0,4 до 0,8 В при изменении тока СИД в указанных пределах. Дальнейшее преобразование выходных импульсов напряжения ПУ в постоянное

напряжение осуществляется амплитудным детектором (АД).

Для компенсации температурного дрейфа выходного напряжения АД авторами предложен и разработан способ компенсации температурного дрейфа оптического измерителя. Основываясь на предварительных теоретических и экспериментальных исследованиях доказано, что основной вклад в температурную нестабильность выходного сигнала измерителя оказывает температурный дрейф СИД. Поэтому в качестве информационного сигнала температуры предложено использовать напряжение СИД ($U_{СИД}(t)$), величина которого изменяется на $-(1,3 \pm 0,2)$ мВ/°С [5] от изменения температуры окружающей среды. Полученный компенсационный сигнал $U_{СИД}(t)$ предварительно усиливается в K_{Y1} раз усилителем Y_1 до уровня выходного информационного сигнала $U_{ВЫХ АД}(CH_4, t)$, который несет информацию об изменении концентрации метана в ОК и температурного дрейфа. Выходной сигнал АД суммируется с напряжением смещения $U_{СМ}$ с помощью сумматор C_1 для устранения аддитивной составляющей погрешности измерений. Выходные сигналы сумматора C_1 и усилителя Y_1 с инвертированием фазы выходного сигнала АД поступают на сумматор C_2 с последующим усилением усилителем Y_2 до необходимого уровня выходного сигнала измерительного канала.

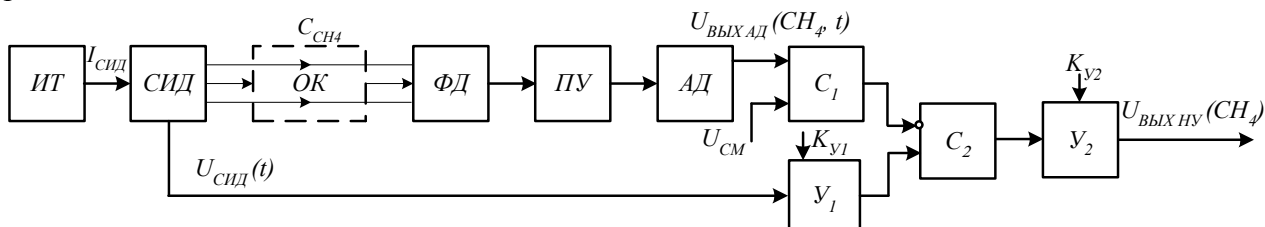


Рисунок 1 – Структурная схема макетного образца измерителя концентрации метана с аппаратной компенсацией температуры окружающей среды

Характеристика преобразования макетного образца измерителя концентрации метана определялась путем измерения среднего значения выходного напряжения измерителя при изменении концентрации метана в диапазоне от 0 до 2,5 об.%. Результаты измерений приведены в табл. 1. На рис. 2 приведены экспериментально определенные характеристики преобразования макетного образца, где \times – Серия № 1; \circ – Серия № 2; ——— – результаты аппроксимации характеристики преобразования уравнением вида:

$$u = S \cdot CH_4 + u_0, \tag{1}$$

где $S, В/об.%$ – чувствительность по выходному напряжению макетного образца к изменению концентрации метана; $u_0 = 0,2 В$ – выходное напряжение при концентрации метана $CH_4 = 0^{об.}\%$.

Чувствительность макетного образца измерителя концентрации метана в диапазоне от 0 до 2,5 об.% по выходному напряжению составляет:

$$S = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{\Delta CH_4} = \frac{1,52 - 0,20}{2,57 - 0} = 0,514 \frac{В}{об.}\%$$

Для расширения динамического диапазона измерений концентрации метана от 0 до 4 об.% авторами рекомендуется аппроксимировать характеристику преобразования (см. рис. 3) уравнением вида:

$$U = U_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot CH_4}) + u_0, \tag{2}$$

где $k = 0,121 (об.}\%)^{-1}$; $U_0 = 5,0 В$; $u_0 = 0,2 В$.

На рис. 3 обозначено: \times – Серия № 1; \circ – Серия № 2; ——— – результаты аппроксимации характеристики преобразование уравнением (2).

Таблица 1
 Результаты измерений характеристики преобразования макетного образца измерителя концентрации метана

Серия № 1		Серия № 2	
Концентрация метана, CH_4 , об.%	Выходное напряжение, В	Концентрация метана, CH_4 , об.%	Выходное напряжение, В
0,00	0,20	0,00	0,36
0,62	0,54	0,45	0,65
0,93	0,76	0,80	0,87
1,41	1,02	1,06	1,03
1,65	1,15	1,34	1,18
1,98	1,29	1,57	1,29
2,18	1,37	1,74	1,38
2,38	1,46	1,98	1,48
2,57	1,52	2,20	1,58
		2,40	1,66
		2,56	1,72

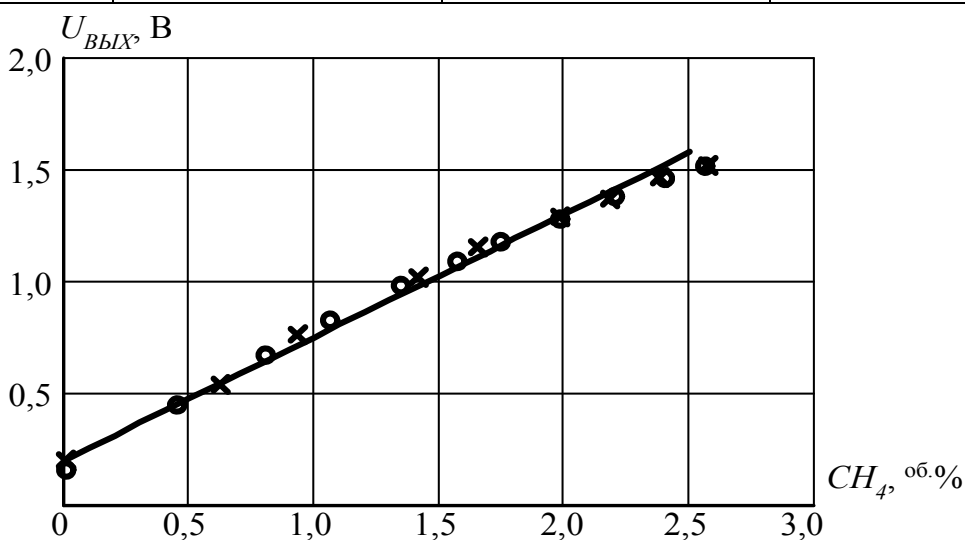


Рисунок 2 – Характеристика преобразования по CH_4 в диапазоне от 0 до 2,5 об.%

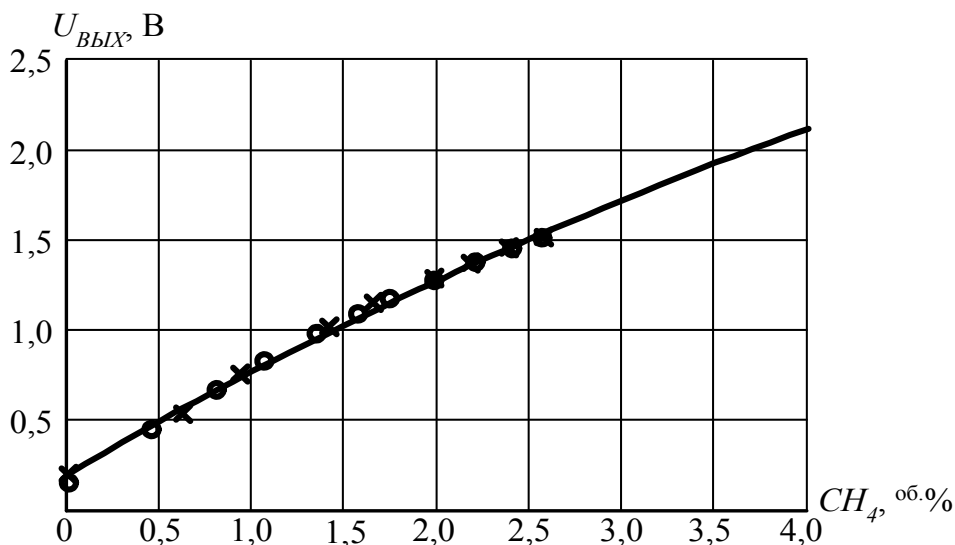


Рисунок 3 – Характеристика преобразования по CH_4 в диапазоне от 0 до 4,0 об.%.
 При проведении предварительных лабораторных испытаний макетного образца было

установлено максимальное амплитудное значение шумовой составляющей выходного напряжения, величина которого не превышает ± 10 мВ. Зависимость отношения сигнал/шум выходного напряжения от концентрации метана приведено на рис. 4, где \times (1) – Серия № 1; \circ (2) – Серия № 2. Из полученных результатов исследований следует:

- характеристика преобразования макетного образца измерителя имеет практически линейный характер в диапазоне изменения концентрации метана от 0 до 2,5 об.-%.
- чувствительность по выходному напряжению макетного образца измерителя концентрации метана составляет порядка 0,51 В/об.-%;
- отношение сигнал/шум макетного образца при минимальной концентрации метана по техническому заданию (0,2 об.-%) составляет 10, на верхней границе диапазона измерения 2,5 об.-% – 130.

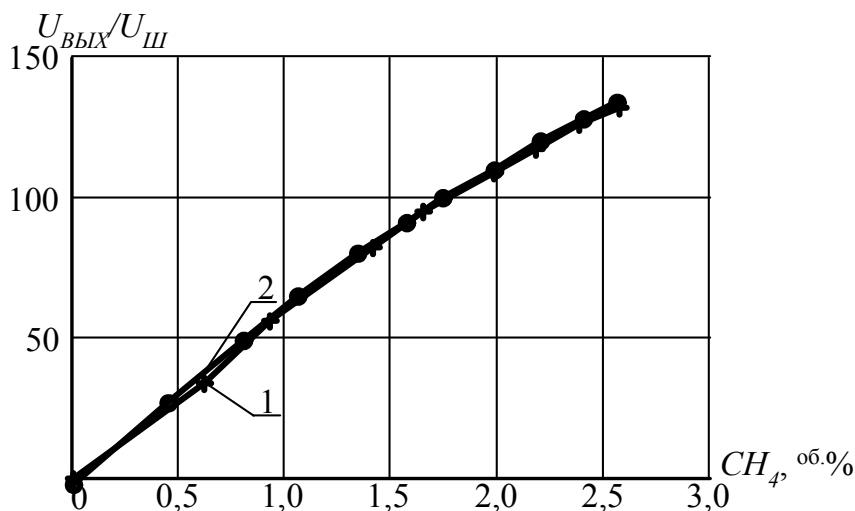


Рисунок 4 – Зависимость отношения сигнал/шум выходного напряжения от CH_4

Абсолютная аддитивная погрешность измерения концентрации метана в диапазоне измерений от 0 до 2,5 об.-% составляет:

$$\Delta_{CH_4} = \frac{U_{Ш}}{S_{CH_4}} = \frac{\pm 0,01}{0,514} = \pm 0,02 \text{ об.-%},$$

что на порядок меньше, чем абсолютная погрешность измерения концентрации метана по техническому заданию (не более $\pm 0,2$ об.-%).

Для исследования влияния изменения температуры окружающей среды на метрологические характеристики макетного образца измерителя проведены лабораторные испытания с использованием термостата. Температура в термостате изменялась в диапазоне от +21 до +30°C, с величиной абсолютной погрешности установки температуры не более ± 1 °C. При проведении лабораторных испытаний получена зависимость изменения выходных напряжений АД (см. рис. 5) и усилителя сигнала (V_I) (см. рис. 6) от изменения температуры. Выходное напряжение V_I пропорционально (в $K_{V_I}=25$ раз) изменению напряжения СИД от температуры. На рис. 5 и 6 обозначено \times – результаты экспериментальных данных; — — — — — результаты кусочно-линейной аппроксимации изменения напряжения от температуры.

Выходное напряжение АД суммируется с дополнительным напряжением смещения $U_{СМ}$, диапазон изменения которого должен регулироваться от 2 до 3 В, и предварительно усиливается сумматором C_1 . Выходные сигналы сумматора C_1 с инвертированием фазы и усилителя V_I поступают на сумматор C_2 с последующим усилением V_2 до необходимого уровня выходного сигнала измерительного канала.

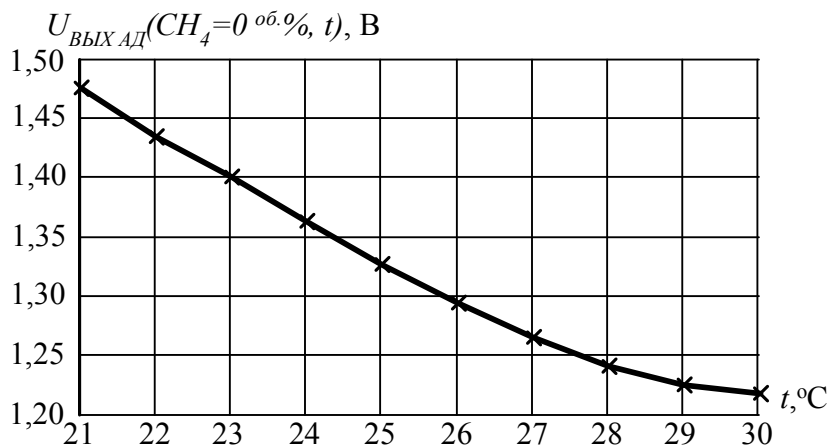


Рисунок 5 – Зависимость выходного напряжения АД от изменения температуры в диапазоне от +21 до +30°C

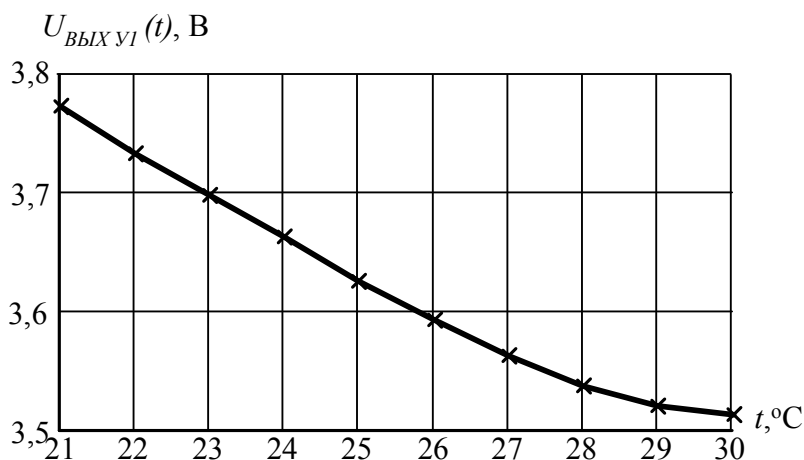


Рисунок 6 – Зависимость выходного напряжения U_1 , пропорционального напряжению СИД ($U_{\text{Сид}}(t)$), от изменения температуры в диапазоне от +21 до +30°C

При проведении лабораторных испытаний макетного образца измерителя с компенсацией изменения температуры получена зависимость изменения выходного напряжения от температуры при постоянной концентрации метана ($C_{\text{CH}_4}=0^{06.}\%$), которая приведена на рис. 7, где \times – результаты экспериментальных данных, ----- – кусочно-линейная аппроксимация результатов экспериментальных данных.

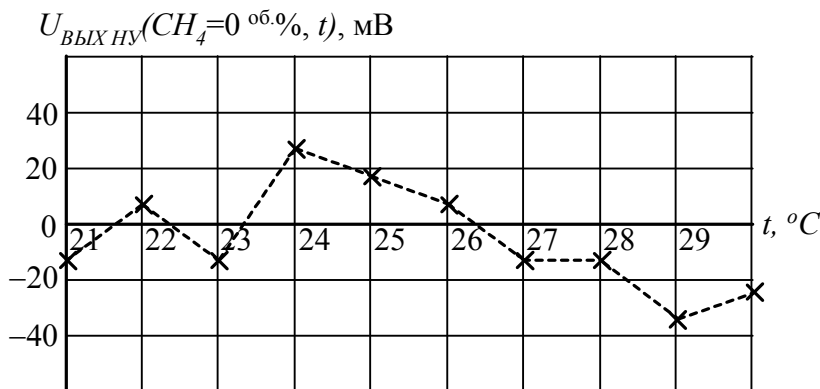


Рисунок 7 – Изменение выходного напряжения макетного образца от изменения температуры окружающей среды в диапазоне от +21 до +30°C

Из анализа полученных экспериментальных данных (см. рис. 7) следует, что максимальное значение амплитуды выходного сигнала от изменения температуры не превышает ± 40 мВ. При этом величина дополнительной погрешности измерения концентрации метана, обусловленная изменением температуры составляет не более $\pm 0,1$ об.%, что в 4 раза меньше чем требований [1] и полностью удовлетворяет поставленным техническим требованиям.

Выводы

1. Разработан и исследован макетный образец быстродействующего оптического измерителя концентрации метана. Лабораторные испытания макетного образца проведены в производственных условиях лаборатории аэрогазовой защиты угольной шахты им. М.И. Калинина, в результате которых установлено:

– характеристика преобразования макетного образца практически линейна в диапазоне измерений концентрации метана от 0 до 2,5 об.%, чувствительность выходного напряжения к изменению концентрации метана в этом диапазоне составляет 0,514 В/об.%;

– отношение сигнал/шум макетного образца при минимальной концентрации метана по техническому заданию ($\pm 0,2$ об.%) составляет 10, на верхней границе диапазона измерения 2,5 об.% – 130;

– абсолютная аддитивная погрешность измерения концентрации метана в диапазоне измерений от 0 до 2,5 об.% составляет не более $\pm 0,02$ об.%, что на порядок меньше, чем абсолютная погрешность измерения концентрации метана по техническому заданию (не более $\pm 0,2$ об.%) в диапазоне от 0 до 4,0 об.%.

2. Разработан и реализован способ компенсации температурного дрейфа измерителя концентрации газа, в котором в качестве термочувствительного элемента предложено использовать светоизлучающий диод. Аппаратная реализация разработанного способа позволила оценить его эффективность: величина дополнительной погрешности измерения концентрации метана обусловленной изменением температуры, составила не более $\pm 0,1$ об.%, что в 4 раза меньше требуемой.

Список использованной литературы

1. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания: ДСТУ ГОСТ 24032:2009. – [Действующий от 2009-02-01]. – К.: Держспоживстандарт, 2009. – 24 с.
2. Методы и средства аналитического измерения концентрации газовых компонент и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт / [А.В. Вовна и др.]. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 260 с.
3. Вовна А.В. Повышение чувствительности измерителя концентрации газов с использованием метода составных параметров / А.В. Вовна, А.А. Зори, Н.П. Косарев // Известия ЮФУ. Технические науки. Выпуск «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении». – 2012. – № 5 (130). – С. 128 – 133.
4. Пристрій для вимірювання концентрації газів: патент 76124 U. Україна, МПК G 01 N 21/35 / О.В. Вовна, А.А. Зорі, В.Д. Коренев, М.Г. Хламов; Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» (Україна). – № u201206736; заявл. 01.06.2012; опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24.
5. Ioffe Physico-Technical Institute [Электронный ресурс] / Mid-IR Diode Optopair Group (MIRDOG). – Электронные данные. – Режим доступа: <http://mirdog.spb.ru>. – Дата доступа: январь 2013. – Загл. с экрана.

Поступила в редакцію:
27.02.2013

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Воронцов О.Г.

О.В. Вовна, А.А. Зорі, І.Я. Лізан

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; навчально-науковий професійно-педагогічний інститут УІПА

Розробка та дослідження вимірювача концентрації метану з апаратною компенсацією температури. Розроблений і досліджений макетний зразок швидкодіючого оптико-абсорбційного вимірювача концентрації метану для умов вугільних шахт. Встановлені характеристики перетворення, чутливість і метрологічні характеристики вимірювача. Розроблено і реалізовано спосіб компенсації температурного дрейфу вимірювача концентрації газу, в якому в якості термочутливого елемента запропоновано використовувати світловипромінюючий діод. Апаратна реалізація розробленого способу дозволила оцінити його ефективність: величина додаткової похибки вимірювання концентрації метану, яка обумовлена зміною температури, склала не більш $\pm 0,1$ об.%, що в 4 рази менше ніж вимагається.

Ключові слова: вимірювач, макетний зразок, випробування, точність, температура.

A.V. Vovna, A.A. Zori, I.Ja. Lizan

Donetsk National Technical University; Educational and Scientific Professional Pedagogical Institute UEPA

Development and Research of a Methane Concentration Meter with Hardware Temperature Compensation. A scale-model of a high-speed optical-absorption methane concentration meter has been developed and investigated for coal mines conditions. The scale-model was tested in a coal mines aerogas protection laboratory, the results showed that: the scale-model transformation characteristic is practically linear in the range of methane concentration measurements from 0 to 2,5 vol.%, the sensitivity of output voltage to a change in methane concentration in this range is 0,514 V/vol.%; the signal/noise ratio of the scale-model at the minimal concentration of methane under the technical project ($\pm 0,2$ vol.%) is 10, at the upper limit of the measuring range it is 2,5 vol.% – 130; the absolute additive error of methane concentration measurement in the measuring range from 0 to 2,5 vol.% is not more than $\pm 0,02$ vol.%, which is smaller than the absolute error of methane concentration measurements under the technical project (no more than $\pm 0,2$ vol.%) ranging from 0 to 4.0 vol.%. The way of temperature drift compensation of methane concentration optical measuring was developed and implemented. The authors proposed to use one of optoelectronic components of the meter as a thermal element. In this case, the temperature drift compensation is most efficient and does not require an individual temperature calibration of each measurement channel separately. Based on preliminary theoretical and experimental studies it was shown that the main contribution to output meter signal thermal instability is made by temperature drift of the light-emitting diode. Therefore, as the temperature information signal we suggest using the light-emitting diode voltage, the value of which changes by $-(1,3 \pm 0,2)$ mV/°C from the ambient temperature. The hardware implementation of the developed way allowed evaluating its effectiveness: the value of additional error of methane concentration measurements due to temperature change is not more than $\pm 0,1$ vol.%, which is 4 times less than required.

Keywords: meter, scaled model, testing, accuracy, temperature.