

УДК 543.421:621.38

О.В. Вовна (канд. техн. наук, доц.), А.А. Зорі (д-р техн. наук, проф.)
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра електронної техніки
E-mail: Vovna_Alex@ukr.net

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОДІЮЧОГО ВИМІРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ МЕТАНУ ІНВАРІАНТНОГО ДО ЗАПИЛЕННЯ РУДНИЧНОЇ АТМОСФЕРИ

Проведені лабораторні випробування розробленого макетного зразка оптико-абсорбційного вимірювача концентрації метану для умов вугільних шахт. Встановлені характеристики перетворення та оцінено його швидкодію. Запропонований спосіб мультиплікативної компенсації запилення рудничної атмосфери вугільних шахт. Поставлені вимоги до розробки дослідного зразка вимірювача концентрації метану.

Ключові слова: вимірювач, макетний зразок, швидкодія, точність, мультиплікативна компенсація, характеристика перетворення, випробування.

Загальна постановка проблеми. Зростання газодинамічних проявів в рудничній атмосфері вугільних шахт вимагає розробки нових і доробки існуючих технічних засобів оперативного контролю концентрації метану, що дозволить врахувати недоліки існуючих газоаналізаторів та вийти на світові вимоги розробки засобів вимірювання концентрації газових компонент подібного типу. Розробка відноситься до області аналітичного вимірювання концентрації газових компонент переважно в умовах запилення рудничної атмосфери вугільних шахт і може бути використана у вимірювальних та управляючих системах аерогазового контролю промислових підприємств та систем екологічного моніторингу.

Постановка задач дослідження. Метою роботи є вдосконалення вимірювачів концентрації газів на базі оптико-абсорбційного методу контролю шляхом розробки способу та його апаратної реалізації для компенсації запилення рудничної атмосфери вугільних шахт.

Для досягнення мети поставлені та вирішені наступні задачі:

- розробити макетний зразок оптико-абсорбційного вимірювача концентрації метану з компенсацією запилення рудничної атмосфери;
- експериментально визначити характеристики перетворення вимірювача;
- практично перевірити ефективність способу мультиплікативної компенсації запилення рудничної атмосфери вугільних шахт на результати вимірювань концентрації метану;
- визначити швидкодію макетного зразка вимірювача.

Результати розробки та досліджень. Структурну схему макетного зразка вимірювача концентрації метану для вугільних шахт наведено на рис. 1 [1]. При побудові макетного зразка вимірювача концентрації метану використані в якості джерела випромінювання (ДВ₁) — світловипромінюючий діод (СВД) LED34, а фотоприймача (ФП₁) — фотодіод (ФД) PD36, при цьому враховано вимоги циркуляції рудничної атмосфери крізь вимірювальну кювету оптичного каналу (ОК₁). Для отримання необхідного значення абсолютної похибки вимірювань концентрації метану не більш 0,2^{об.}% [2] в умовах високої запиленості рудничної атмосфери вугільних шахт розроблено та досліджено спосіб мультиплікативної компенсації запилення рудничної атмосфери [3], який реалізовано на основі двоканального вимірювача. Для апаратної реалізації даного способу введений додатковий компенсаційний канал ОК₂ з ДВ₂ — СВД LED29 та ФП₂ — ФД PD36 [4].

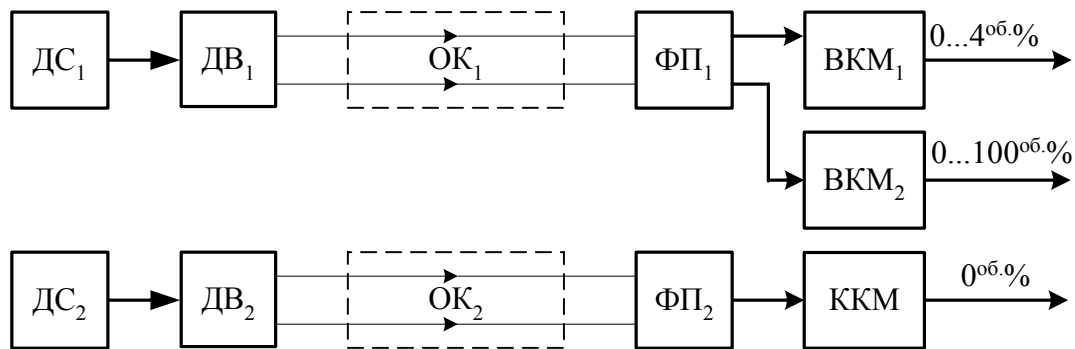


Рисунок 1 — Структурна схема макетного зразка вимірювача концентрації метану

Для живлення вимірювального (ДВ₁) та компенсаційного (ДВ₂) СВД використані джерела струму (ДС), які керовані напругою. Структурну схему керованого джерела струму для живлення СВД наведено на рис. 2, де СВД — світловипромінюючий діод, ДС — джерело струму, яке кероване напругою; ДЖ — джерело живлення; ДОН — джерело опорної напруги; К — ключ; СУ_{ДС} — сигнал управління ДС від мікроконтролера. До джерела струму, яке кероване напругою підключається безпосередньо СВД, напруга на вході ДС встановлюється ДОН. Величина напруги на виході ДОН плавно регулюється вихідним дільником напруги, що забезпечує плавне регулювання амплітуди живлячого струму СВД. Формування імпульсної послідовності живлячого струму СВД виконується сигналами управління від мікроконтролера (СУ_{ДС}) через аналоговий ключ, що забезпечує імпульсний режим роботи СВД.

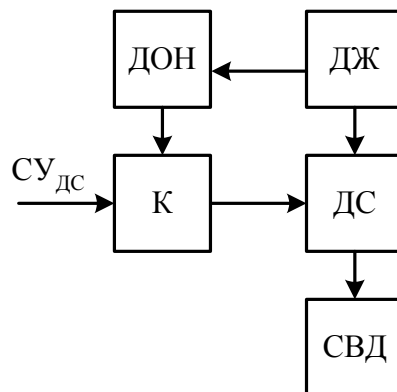


Рисунок 2 — Структурна схема джерела струму для живлення СВД

Структурну схему вимірювальних (ВКМ) та компенсаційного (ККМ) каналів макетного зразка вимірювача концентрації метану наведено на рис. 3. Для забезпечення фотогальванічного режиму роботи ФД PD36 використано трансімпедансний підсилювач (перетворювач струму в напругу) — фотоприймальний пристрій (ФПП). Попередній підсилювач (ПП) вихідного сигналу ФПП збільшує амплітуду сигналу до рівня необхідного для нормальної роботи амплітудного детектора (АД). АД з урахуванням постійної інтегрування виконує перетворення амплітуди вихідної імпульсної послідовності ПП в сигнал постійної напруги, значення якого пропорційно вимірювальній концентрації метану. Вихідний сигнал АД подається на нормуючий перетворювач (НП), який виконує додаткову низькочастотну фільтрацію вихідного сигналу АД, а також масштабує його, забезпечуючи вхідний рівень АЦП.

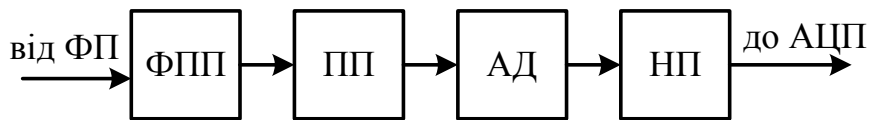


Рисунок 3 — Структурна схема вимірювальних (ВКМ) та компенсаційних (ККМ) каналів макетного зразка вимірювача

При проектуванні макетного та дослідного зразків вимірювача концентрації метану, поставлено вимоги до наступних блоків:

1. Джерело струму для живлення СВД:

- заземлене навантаження;
- прямокутні імпульси струму в навантаженні;
- діапазон зміни амплітуди імпульсів струму, А від 1,4 до 1,6;
- частота повторення імпульсів струму, кГц 2;
- період повторення імпульсів струму, мкс 500;
- діапазон зміни тривалості імпульсу струму, мкс від 10 до 20;
- тривалість фронту імпульсу, мкс не більш 2;
- тривалість спаду імпульсу, мкс не більш 3;
- амплітуда управляючої напруги від мікроконтролера

$U_{УПР}^0$, В плюс (0,3...0,4);

$U_{УПР}^1$, В плюс (4,8...4,9);

- напруга живлення, $U_{ж}$, В ± 9;
- нестабільність напруги джерела живлення, % ± 0,1.

2. Аналоговий канал вимірювача концентрації метану:

- діапазон зміни амплітуди струму ФД, мкА від 0,4 до 0,8;
- режим роботи ФД близький до короткого замикання;
- максимальне значення різниці потенціалів на ФД, мВ не більш 1;
- операційний підсилювач ФПП з польовими транзисторами з р-n-переходом на входах (FET input);

- лінійність характеристики передачі ФПП;
- мінімальний рівень шуму ФПП;
- максимальне значення вхідного струму ФПП, пА не більш 10;
- мінімальне значення амплітуди вихідної напруги ФПП, В не менше 0,5;
- смуга пропускання ФПП, МГц не більш 1,0;
- діапазон зміни амплітуди вхідної напруги АД, В від + 2,5 до + 4,0;
- максимальне значення вихідної напруги АД, В не більш +7,5;
- діапазон зміни вихідної напруги НП, В від +0,2 до +4;
- смуга пропускання НП, Гц не більш 10;
- напруга живлення, $U_{ж}$, В ± 9;
- нестабільність напруги джерела живлення, % ± 0,1.

Лабораторні випробування макетного зразка вимірювача концентрації метану було проведено у виробничих умовах лабораторії АКУ Державного підприємства «Петровський завод вугільного машинобудування». Лабораторні випробування виконувалися з використанням повітряних газових сумішей (ПГС) в балонах наступних типів: $(1,30 \pm 0,15) \%$; $(2,51 \pm 0,08) \%$; $(4,30 \pm 0,15) \%$; $(97,0 \pm 0,5) \%$.

Характеристики перетворення макетного зразка вимірювача концентрації метану визначені шляхом вимірювань середніх значень вихідних напруг вимірювальних каналів

(ВКМ та ККМ) при подачі газових сумішей з балонів ПГС до закритих вимірювальних кювет. Результати вимірювань наведено в табл. 1.

Таблиця 1 — Результати вимірювання характеристик перетворення макетного зразка вимірювача концентрації метану

Концентрація метану, C_{CH_4} , об.%	Середнє значення вихідної напруги макетного зразка вимірювача, $U_{ВИХ}$, В		
	№ 1	№ 2	№ 3
0	0,01	0,005	0,003
1,30	0,24	—	—
2,51	—	0,406	0,398
4,30	0,52	0,540	0,522
97,0	15,4	16,01	—

На рис. 4 наведено експериментально визначені характеристики перетворення макетного зразка, які відповідають діапазонам вимірювань а) від 0 до 4,3 об.%, та б) від 0 до 97 об.%. На рис. 4 позначено: • № 1; × № 2; + № 3 — серії вимірювань; — — результати апроксимації характеристик перетворення.

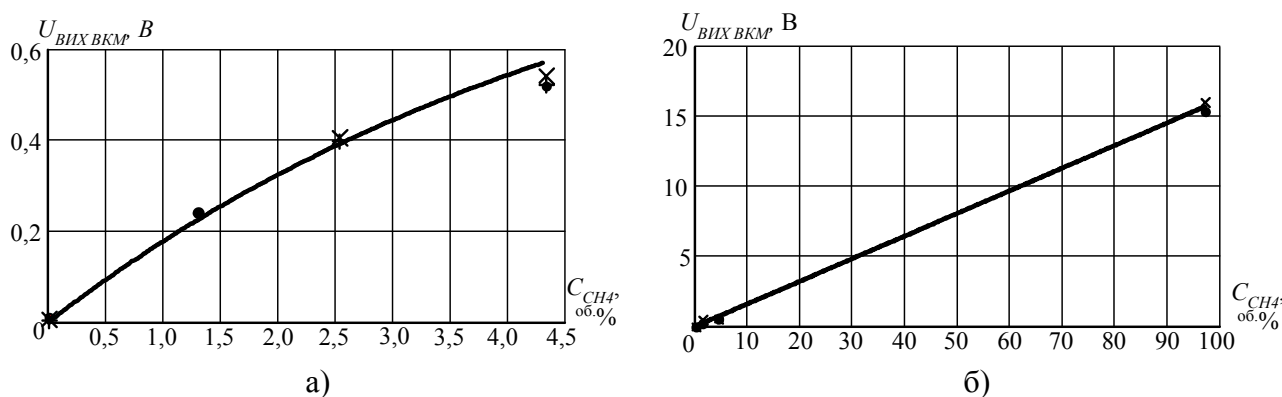


Рисунок 4 — Характеристики перетворення макетного зразка вимірювача концентрації метану в діапазонах: а) від 0 до 4,3 об.%; б) від 0 до 97,0 об.%

Встановлена чутливість макетного зразка вимірювача концентрації метану в наступних діапазонах:

– від 0 до 4,3 об.%:

$$S_{CH_4} = \frac{\Delta U_{ВИХ ВКМ}}{\Delta C_{CH_4}} = \frac{0,552 - 0,003}{4,3 - 0} = 0,128 \frac{В}{об.‰};$$

– від 0 до 97 об.%:

$$S_{CH_4} = \frac{\Delta U_{ВИХ ВКМ}}{\Delta C_{CH_4}} = \frac{15,4 - 0,003}{97 - 0} = 0,159 \frac{В}{об.‰}.$$

Характеристики перетворення макетного зразка мають практично лінійний характер в діапазонах вимірювань концентрації метану від 0 до 4,0 об.%, та від 0 до 97 об.%. Чутливість макетного зразка вимірювача в діапазоні вимірювань концентрації метану від 0 до 4,3 об.%, відповідно 0,128 В/об.%, та від 0 до 97 об.%, — 0,159 В/об.%,

Для перевірки способу мультиплікативної компенсації запилення рудничної атмосфери вугільних шахт визначені характеристики перетворення ВКМ та ККМ макетного зразка при зміні: концентрації метану в діапазоні від 0 до 4,3^{об.о%} та коефіцієнту пропускання оптичного випромінювання від 1,00 до 0,30 в діапазоні довжин хвиль від 2,5 до 4,0 мкм. При проведенні лабораторних випробувань використані спеціальні плівки з різними коефіцієнтами пропускання оптичного випромінювання: 100 %; (90 ± 1) %; (50 ± 1) %; (30 ± 1) %. Для перевірки ефективності розробленого способу визначалася інформаційна складова вихідного сигналу, $M_{ух}$, яка пропорційна концентрації метану з компенсацією впливу вугільного пилу, у вигляді відношення вихідних напруг вимірювальних каналів:

$$M_{ух} = \frac{U_{ВИХ ВКМ}}{U_{ВИХ ККМ}},$$

де $U_{ВИХ ВКМ}$ та $U_{ВИХ ККМ}$ — вихідні напруги вимірювальних каналів ВКМ та ККМ макетного зразка.

В табл. 2 наведено результати лабораторних випробувань макетного зразка вимірювача при зміні оптичної щільності пилу та концентрації метану.

Таблиця 2 — Характеристики перетворення вимірювача при зміні оптичної щільності пилу та концентрації метану

C_{CH_4} , об.о%	$U_{ВИХ ВК}$, В	Коефіцієнт пропускання, T , % (концентрація вугільного пилу, C_C , мг/м ³)			
		100 (0)	90 (158)	50 (1039)	30 (1805)
0	$U_{ВИХ ВКМ}$, В	1,00	0,90	0,50	0,30
	$U_{ВИХ ККМ}$, В	1,01	0,90	0,51	0,30
	$M_{ух}$	0,99	1,00	0,98	1,00
1,30	$U_{ВИХ ВКМ}$, В	1,24	1,10	0,61	0,35
	$U_{ВИХ ККМ}$, В	1,02	0,89	0,50	0,29
	$M_{ух}$	1,22	1,24	1,22	1,21
2,51	$U_{ВИХ ВКМ}$, В	1,41	1,23	0,70	0,41
	$U_{ВИХ ККМ}$, В	1,03	0,89	0,51	0,30
	$M_{ух}$	1,37	1,38	1,37	1,37
4,30	$U_{ВИХ ВКМ}$, В	1,52	1,37	0,77	0,47
	$U_{ВИХ ККМ}$, В	1,01	0,91	0,51	0,31
	$M_{ух}$	1,51	1,51	1,51	1,52

На рис. 5 наведені експериментальні характеристики перетворення макетного зразка вимірювача, які відповідають різним значенням оптичної щільності пилу та концентраціям метану: експериментальні значення характеристик перетворення макетного зразка вимірювача при зміні оптичної щільності вугільного пилу: + — 100 % (0 мг/м³); □ — 90 % (158 мг/м³); ◇ — 50 % (1039 мг/м³); ○ — 30 % (1805 мг/м³); — — результати апроксимації характеристик перетворення.

З аналізу характеристик перетворення, які наведено на рис. 5, можна зробити наступний висновок, що при реалізації розробленого способу мультиплікативної компенсації запилення рудничної атмосфери вугільних шахт практично усувається складова, яка обумовлена

наявністю вугільного пилу у вимірювальному каналі. Отже, при розробці дослідного зразка вимірювача необхідно використовувати двоканальну оптичну схему, що дозволить врахувати та компенсувати вплив одного з основних дестабілізуючих чинників рудничної атмосфери — впливу вугільного пилу, та одержати необхідні метрологічні характеристики вимірювача.

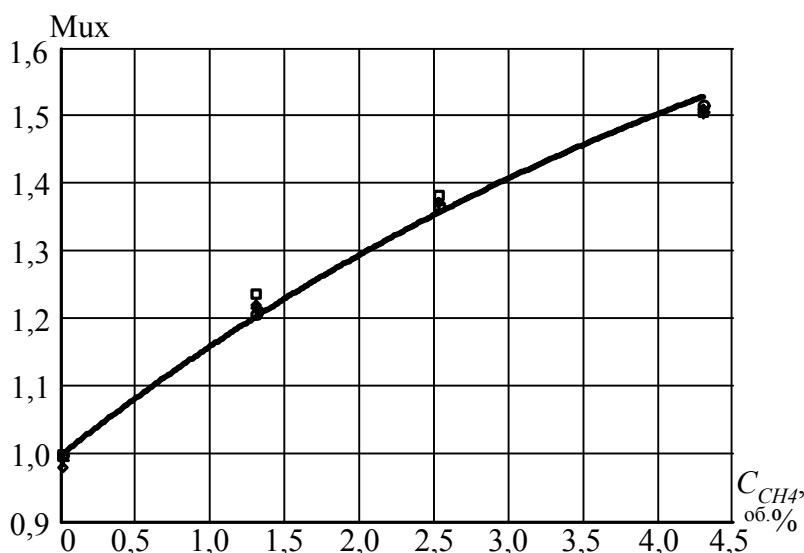


Рисунок 5 — Характеристика перетворення вимірювача концентрації метану з урахуванням компенсації (M_{ux}) запылення рудничної атмосфери

Для визначення швидкодії макетного зразка вимірювача запропонована методика та пристрій її реалізації, який використовує диск, що обертається, з отвором, що має 100 % коефіцієнт пропускання оптичного випромінювання. При зміні частоти обертання приводу диска за допомогою вимірювального осцилографа визначалася тривалість перехідного процесу при встановленні вихідної напруги вимірювального каналу макетного зразка на рівні 0,9 від сталого значення. Тривалість перехідного процесу визначалася за наступною формулою:

$$t_{\Pi} = \sqrt{t_{\Pi \text{ ВИМ}}^2 + t_{\Pi \text{ СПШ}}^2},$$

де $t_{\Pi \text{ ВИМ}}$ — тривалість перехідного процесу при встановленні вихідної напруги макетного зразка вимірювача концентрації метану; $t_{\Pi \text{ СПШ}}$ — тривалість перехідного процесу системи перевірки швидкодії вимірювача (час неповного перекриття оптичного променя диском, що обертається).

Результати лабораторних випробувань для визначення швидкодії макетного зразка вимірювача наведено в табл. 3. На рис. 6 наведено графік зміни тривалості перехідного процесу при встановленні вихідної напруги від частоти обертання диску. При збільшенні частоти обертання диску тривалість перехідного процесу $t_{\Pi \text{ СПШ}}$ зменшується у порівнянні із $t_{\Pi \text{ ВИМ}}$, та її внесок до загального часу перехідного процесу також зменшується. Тому експериментально визначено, що при частоті обертання диску більше 2,0 Гц тривалість перехідного процесу при вимірюванні концентрації метану макетним зразком вимірювача складає 53 мс, при цьому внесок у загальний час перехідного процесу $t_{\Pi \text{ СПШ}}$ є незначним (див. рис. 6). Теоретичний розрахунок тривалості перехідного процесу з використанням перехідної функції вимірювального каналу, складає 47 мс [1], що практично узгоджується з експериментальними даними.

Таблиця 3 — Результати лабораторних досліджень для визначення швидкодії макетного зразка вимірювача

Частота обертання диску, $f=1/T$, Гц	Період зміни отворів диску, T , с	Тривалість перехідного процесу при встановленні вихідної напруги, t_{II} , мс
0,50	2,00	59,0
1,00	1,00	55,4
1,49	0,67	54,1
2,00	0,50	53,3
2,50	0,40	53,0

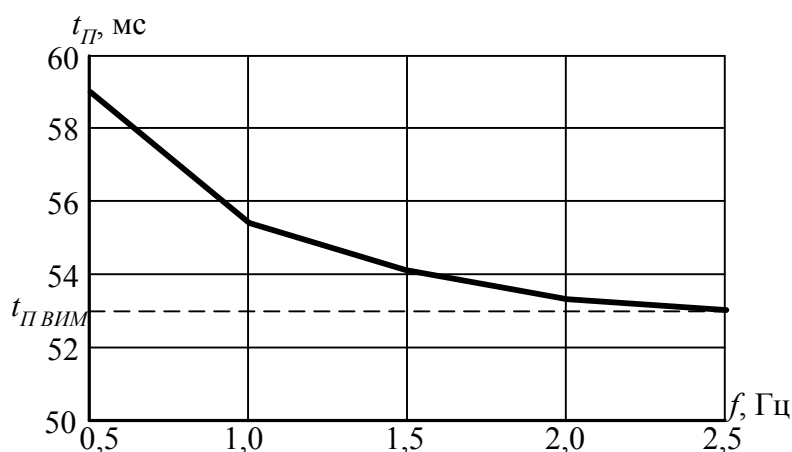


Рисунок 6 — Зміна тривалості перехідного процесу t_{II} від частоти обертання диску (f)

Отже, швидкодія розробленого макетного зразка вимірювача складає не більш 0,06 с. при максимально допустимому часі спрацьовування метанометрів 0,8 с, який визначено згідно ДСТУ [2]. Проведені дослідження підтверджують можливість роботи вимірювача для контролю концентрації метану в рудничній атмосфері вугільних шахт за наявності пилу, концентрація якої досягає значень порядку 1 г/м^3 .

Висновки

1. Розроблений та досліджений макетний зразок вимірювача концентрації метану. Лабораторні випробування макетного зразка проведено у виробничих умовах лабораторії АКУ Державного підприємства «Петровський завод вугільного машинобудування», в результаті яких встановлено:

– характеристика перетворення макетного зразка практично лінійна в діапазонах вимірювань концентрації метану від 0 до $4,0 \text{ }^{06}\%$ та від 0 до $97,0 \text{ }^{06}\%$, чутливість макетного зразка вимірювача в діапазоні вимірювань концентрації метану від 0 до $4,3 \text{ }^{06}\%$ відповідно $0,128 \text{ В/}^{06}\%$ та від 0 до $97 \text{ }^{06}\%$ — $0,159 \text{ В/}^{06}\%$.

– швидкодія розробленого макетного зразка вимірювача, складає не більш 0,06 с, при максимально допустимому часі спрацьовування метанометрів 0,8 с, що підтверджує доцільність вибраного методу контролю концентрації метану у вугільних шахтах.

2. Запропонований спосіб мультиплікативної компенсації запилення рудничної атмосфери вугільних шахт та його апаратна реалізація. При проведенні лабораторних випробувань доведена ефективність розробленого способу, який практично усуває складову похибки, що обумовлену наявністю вугільного пилу в оптичному каналі вимірювача.

3. Сформульовані технічні вимоги до дослідного зразка швидкодіючого вимірювача концентрації метану для умов вугільних шахт. В перспективі подальших розробок аналітичних вимірювачів концентрації газових компонент планується створення дослідного зразка вимірювача, проведення його комплексних випробувань в лабораторних умовах та безпосередньо в умовах вугільних шахт; розробка дослідної партії вимірювача концентрації метану та впровадження його в систему аерогазового захисту шахт.

Список використаної літератури

1. 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.
2. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания: ДСТУ ГОСТ 24032:2009. — [Действующий от 2009-02-01]. — К.: Держспоживстандарт, 2009. — 24 с.
3. Спосіб вимірювання концентрації метану в рудниковій атмосфері: патент 91795 С2. Україна, МПК G 01 N 21/35 / Вовна О.В., Зорі А.А., Коренев В.Д., Хламов М.Г.; власник патенту Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». — № а200906379; заява 19.06.2009; опублік. 25.08.2010, Бюл. № 8.
4. Пристрій для вимірювання концентрації метану в рудничній атмосфері: патент 92564 С2. Україна, МПК G 01 N 21/35 / Вовна О.В., Зорі А.А., Коренев В.Д., Хламов М.Г.; власник патенту Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». — № а200909360; заява 11.09.2009; опублік. 10.11.2010, Бюл. № 21.

Надійшла до редакції:
01.02.2012 р.

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

A.V. Vovna, A.A. Zori. Development and research of high-speed methane concentration measuring device is invariant to dust the mine atmosphere. The laboratory tests were conducted of IR-designed layout design of optical absorption measuring methane concentration for the coal mines conditions. The transformation characteristics were established and evaluated its speed. A method were proposed for atmospheric mine dust multiplicative compensation in coal mines. The requirements were raised for a prototype development of methane concentration measuring.

Keywords: meter, layout design, speed, accuracy, multiplicative compensation, the characteristic transformation, testing.

А.В. Вовна, А.А. Зори. Разработка и исследование быстродействующего измерителя концентрации метана инвариантного к запыленности рудничной атмосферы. Проведены лабораторные испытания разработанного макетного образца оптико-абсорбционного измерителя концентрации метана для условий угольных шахт. Установлены характеристики преобразования и оценено его быстродействие. Предложен способ мультипликативной компенсации запыленности рудничной атмосферы угольных шахт. Поставлены требования к разработке опытного образца измерителя концентрации метана.

Ключевые слова: измеритель, макетный образец, быстродействие, точность, мультипликативная компенсация, характеристика преобразования, испытания.

© Вовна О.В., Зорі А.А., 2012