

УДК 543.42:621.384.3:622.412

О.В. Вовна

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра електронної техніки
E-mail: Vovna_Alex@ukr.net

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ШВИДКОДІЮЧОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ МЕТАНУ У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

Abstract

Vovna A.V. Development of mathematical model of fast-acting measuring system for methane concentration control in coal mines. There was first developed the mathematical model, which realizes optic-absorption method to control methane concentration. This system takes into account mine atmosphere influences such as temperature and pressure changes, also optical and analog channels parameters of measuring device. It allows estimating metrologies characteristics of the system's measuring channels with sufficient degree of exactness.

Keywords: concentration of methane, coal mine, optiko-absorbing method, mathematical model, informative-measuring system.

Анотація

Вовна О.В. Розробка математичної моделі швидкодіючої вимірювальної системи контролю концентрації метану у вугільних шахтах. Розроблена математична модель, яка реалізує оптико-абсорбційний метод контролю концентрації метану. Ця модель враховує вплив зміни параметрів рудничної атмосфери, таких як температура та тиск, а також параметри оптичних та аналогових каналів вимірювача. Це дозволяє оцінити метрологічні характеристики вимірювальних каналів системи з достатнім ступенем точності.

Ключові слова: концентрація метану, вугільна шахта, оптико-абсорбційний метод, математична модель, інформаційно-вимірювальна система.

Аннотация

Вовна А.В. Разработка математической модели быстродействующей измерительной системы контроля концентрации метана в угольных шахтах. Разработана математическая модель, которая реализует оптико-абсорбционный метод контроля концентрации метана. Данная модель учитывает влияние изменения параметров рудничной атмосферы, таких как температура и давление, а также параметры оптических и аналоговых каналов измерителя. Это позволяет оценить метрологические характеристики измерительных каналов системы с достаточной степенью точности.

Ключевые слова: концентрация метана, угольная шахта, оптико-абсорбционный метод, математическая модель, информационно-измерительная система.

Загальна постановка проблеми. Із зростанням глибини розробок вугілля збільшується частота та інтенсивність газодинамічних проявів у вугільних шахтах, що веде до підвищення небезпеки при веденні гірських робіт. В таких умовах виникає необхідність комплексного переоснащення вугільних шахт швидкодіючими вимірювальними системи контролю складу і параметрів рудничної атмосфери.

Найефективнішими з погляду швидкодії при використуванні в шахтах, які небезпечні по раптовим викидам газу, є метанометри, засновані на вимірюванні оптичного погли-

нання ІЧ-випромінювання, що пройшло через шар газу і частково поглиненого їм. Проте в шахтах із звичним режимом газовиділення використання вказаного типу вимірювачів було обмежено складністю обслуговування апаратури в шахтних умовах. Одним з головних факторів, який збільшує методичну похибку виміру концентрації метану, є наявність вугільного пилу у вимірювальному каналі. Були зроблені спроби виключити вплив даного фактору на результати виміру концентрації метану, введенням системи пробопідготовки, яка очищує аналізовану газову суміш від вугільного пилу. Але це не привело до бажаного результату через те, що величина швидкодії даних типів вимірювачів при необхідній точності контролю концентрації метану, визначається транспортним часом системи пробопідготовки [2], яка на порядок перевищує вимоги по швидкодії стаціонарних метанометрів [1].

Постановка задачі дослідження. Спираючись на вимоги до стаціонарних вимірювачів концентрації метану в рудничній атмосфері, аналіз існуючих вимірювачів показав, що найефективнішим є оптико-абсорбційний метод контролю концентрації метану. Даний метод має потенційні можливості для створення нових швидкодіючих вимірювачів концентрації метану у вугільних шахтах. З метою отримання технічних характеристик і параметрів вимірювальної системи контролю концентрації метану, заснованої на оптико-абсорбційному методі, необхідно розробити математичну модель вимірювача з урахуванням комплексу дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери, які впливають на метрологічні характеристики вимірювача. Виявлення цих факторів і встановлення залежностей, що впливають на показники точності вимірювача концентрації метану, дозволить врахувати їх та розробити способи компенсації, застосування яких істотно підвищить швидкодію при необхідній точності контролю концентрації метану у вугільних шахтах.

З метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі вимірювальної системи контролю концентрації метану, необхідно розробити макетний зразок вимірювача та оцінити його метрологічні характеристики.

Рішення задачі та результати дослідження. Функціональна схема вимірювальної системи контролю концентрації метану, яка заснована на оптико-абсорбційному методі виміру, приведена на рис. 1, складається з оптоелектронного та аналогового блоку. Для вибору оптоелектронних компонент вимірювача необхідно провести аналіз спектру поглинання метану по інтенсивності та частоті коливально-обертальної структури і визначити дестабілізуючі фактори, які впливають на процес виміру концентрації метану. Для аналогового блоку вимірювача необхідно вибрати та забезпечити режим роботи фотоприймача оптичного випромінювання і виконати нормування характеристик перетворення оптоелектронного блоку вимірювача до уніфікованого формату для подальшого перетворення та обробки в цифровій формі.

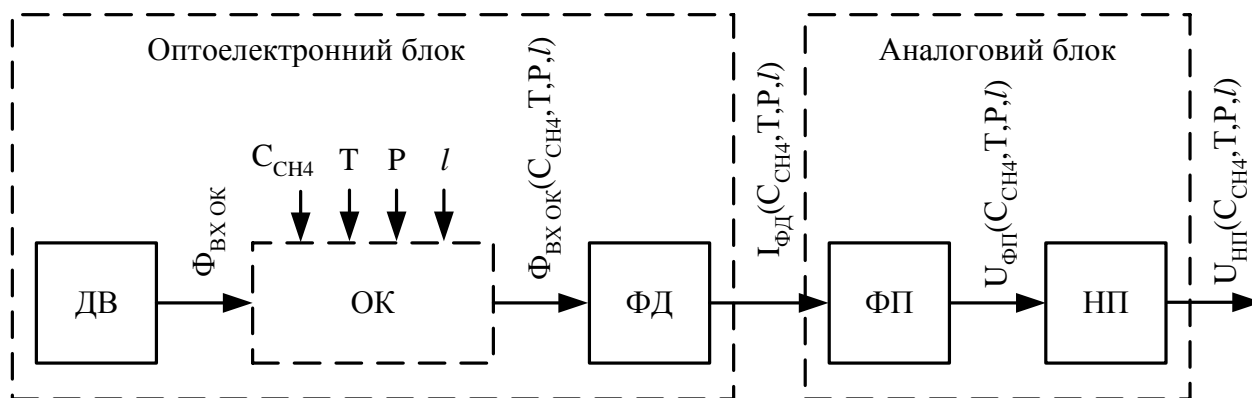


Рисунок 1 — Функціональна схема вимірювальної системи контролю концентрації метану у вугільних шахтах

Вхідний потік оптичного випромінювання $\Phi_{ВХ ОК}$, який формується джерелом випромінювання (ДВ), поступає у відкритий оптичний канал (ОК). Для отримання номінальної ха-

рактики перетворення вимірювача не враховується наявність вугільного пилу в рудничній атмосфері. Поглинання оптичного випромінювання в ОК описується законом Бугера-Ламберта-Бера [3], який зв'язує інтенсивність поглинання з довжиною шляху і концентрацією досліджуваного газового компоненту та описується виразом:

$$I_{ВИХ\ ОК} = I_{ВХ\ ОК} \cdot e^{-K(\lambda, T, P) \cdot C_{CH_4} \cdot l}, \quad (1)$$

де $I_{ВХ\ ОК}$ і $I_{ВЫХ\ ОК}$ — інтенсивності падаючого та минулого оптичного випромінювання, Вт/срад, величини яких пропорційні вхідному $\Phi_{ВХ\ ОК}$, Вт та вихідному $\Phi_{ВИХ\ ОК}$, Вт потоку оптичного сигналу; C_{CH_4} , моль/см³ — молярна концентрація метану у вимірювальному оптичному каналі; l , м — товщина аналізованого шару речовини, яка дорівнює довжині вимірювального каналу; $K(\lambda, T, P)$ — коефіцієнт перетину спектру поглинання оптичного випромінювання метаном, який залежить від температури T , °К та тиску P , кПа рудничної атмосфери.

Для вибору оптимальних параметрів відкритого оптичного каналу рекомендується використовувати комплексний параметр D — оптична густина вимірювального каналу, який визначається як:

$$D(C_{CH_4}, T, P, \lambda, l) = K(\lambda, T, P) \cdot C_{CH_4} \cdot l. \quad (2)$$

Тоді інтенсивність оптичного випромінювання на виході ОК розраховується по співвідношенню:

$$I_{ВИХ\ ОК} = I_{ВХ\ ОК} \cdot e^{-D(C_{CH_4}, T, P, \lambda, l)}. \quad (3)$$

При вимірюванні об'ємної концентрації метану $C_{об\%}$, [об%] виконується перерахунок з об'ємної концентрації метану в молярну концентрацію C_M , [моль/см³] [4]:

$$C_M(C_{об\%}, T, P) = \frac{C_{об\%} \cdot P}{100 \cdot R \cdot T} \cdot 10^{-6} = \frac{16,04 \cdot 10^{-8} \cdot C_{об\%} \cdot P}{T}, \quad (4)$$

де P , [Па] і T , [°К] — тиск і температура газової суміші рудничної атмосфери; R — універсальна газова постійна, Дж/(моль·К).

Тоді оптична густина аналізованої газової суміші для визначення об'ємної концентрації метану розраховується з виразу:

$$D(C_{об\%}, T, P, \lambda, l) = K(\lambda, T, P) \cdot C_M(C_{об\%}, T, P) \cdot l. \quad (5)$$

Використовуючи вирази (3) та (5), визначимо коефіцієнт передачі оптичного каналу $K_{ОК}$, який дорівнює відношенню інтенсивності оптичних потоків, що пройшов $I_{ВИХ\ ОК}$ та поступив $I_{ВХ\ ОК}$ в оптичний канал:

$$K_{ОК}(C_{об\%}, T, P, \lambda, l) = \exp(-D(C_{об\%}, T, P, \lambda, l)). \quad (6)$$

Як видно з виразу (6), коефіцієнт передачі оптичного каналу є нелінійною функцією п'яти змінних, три з яких: $C_{об\%}, T, P$ характеризують стан рудничної атмосфери, λ — довжина хвилі спектральних ліній поглинання метану, l — довжина вимірювальної бази оптичного каналу (конструктивний параметр).

Ефективна робота оптоелектронного блоку визначається максимально можливим коефіцієнтом передачі $K_{ОК}$ відкритого оптичного каналу, для визначення $K_{ОК}$ необхідно виконати наступні дослідження:

- оцінка характеристик спектру поглинання метану і вибір оптимальної довжини хвилі і ширини спектру поглинання;
- вибір оптимального конструктивного параметру l — довжини вимірювальної бази каналу;
- оцінка впливу факторів рудничної атмосфери — зміна температури і тиску на результати виміру об'ємної концентрації метану в діапазоні від 0 до 4^{об%}, що визначено вимогами ДСТУ для вугільних шахт.

Коефіцієнти перетину спектру поглинання метану розраховані за експериментальними даними, які одержані при високій роздільній здатності аналізатора спектрального складу газової атмосфери [5]. Відносне середньоквадратичне відхилення експериментальних значень від результатів математичного моделювання перетину спектру поглинання метану в ІЧ-області не перевищує 0,01 %.

Як джерело ІЧ-випромінювання в роботі запропоновано використовувати світловопромінюючий діод (СВД) LED34–TEC–PR–1 [6], який має максимум випромінювання на довжині хвилі 3,3 мкм і шириною спектру, що дорівнює 0,5 мкм. СВД розроблений для портативних вимірювачів концентрації вуглеводнів: метану, етану, пропану та інших газів. Як приймач ІЧ-випромінювання виробником оптоелектронних компонент рекомендується використовувати фотодіод (ФД) PD36–03TEC1–PR [6], оскільки, його спектральні характеристики найбільш близькі та узгоджені із спектральними характеристиками вибраного джерела випромінювання СВД LED34–TEC–PR–1. Даний ФД призначений для використання як приймач ІЧ-випромінювання вимірювачів концентрації вуглеводнів: метану, етану, пропану та інших газів, що працюють в діапазоні довжин хвиль від 2,00 мкм до 3,60 мкм [6].

Оптичне ІЧ-випромінювання від джерела проходить відкритий оптичний канал ОК та потрапляє на фотодетектор ФД. ІЧ-потік проходить ділянки вимірювального каналу з різними оптичними властивостями. Втрати на всьому оптичному тракті складатимуться з втрат на кожній ділянці, що підлягає оцінці. Для ефективної роботи оптоелектронного блоку необхідно мінімізувати втрати ІЧ-потіку. При проведенні досліджень, були одержані оцінки втрат оптичного випромінювання, що дозволить встановити конструктивні параметри і характеристики вимірювача з високим спектральним к.к.д.

Розрахункове значення коефіцієнта введення оптичного випромінювання у вікно об'єктиву фотодетектора складає 5 % від повного потоку випромінювання СВД. Для збільшення даного показника, запропоновано використовувати СВД з оптичним рефлектором [6], який звужує діаграму спрямованості потоку випромінювання СВД. При використанні СВД з оптичним рефлектором, коефіцієнт введення оптичного випромінювання підвищується до рівня 7,5 %.

Аналоговий блок вимірювальної системи виконує функцію перетворення сигналу струму фотодіода, що містить інформацію про об'ємну концентрацію метану, до уніфікованого вигляду для його перетворення та цифрової обробки в мікропроцесорній системі (МПС) ІВС контролю концентрації метану. Аналоговий блок містить фотоприймач та нормуючий перетворювач, для встановлення параметрів і характеристик, що погоджують сигнал струму оптоелектронної системи з входом аналого-цифрового перетворювача (АЦП) МПС.

Фотодіод PD36–03TEC1–PR розроблений для фотогальванічного режиму включення [6]. Напрямок фотоструму в замкнутому колі співпадає з напрямом зворотного струму через р-п-перехід. Відмінною особливістю роботи фотодіода у фотогальванічному режимі є незалежність струму фотодіода від температури. У фотогальванічному режимі виділяють два гранично допустимих режиму роботи:

- режим близький до короткого замикання;
- режим близький до холостого ходу.

У режимі короткого замикання падіння напруги на фотодіоді прагне до нуля, струм фотодіода виявляється пропорційним світловому потоку. Режим короткого замикання реалізований на операційному підсилювачі, що включений по схемі перетворювача «струм-напруга», при якому вхідний опір перетворювача прагне до нуля. Вихідна напруга фотоприймача розраховується по формулі:

$$U_{\text{вих ФП}}(C_{\text{об\%}}, T, P, l) = I_{\text{ФД}}(C_{\text{об\%}}, T, P, l) \cdot R_H. \quad (7)$$

де R_H — опір навантаження фотодіода.

Нормуючий перетворювач (НП) виконує перетворення сигналу $U_{ВИХ ФП}$ з виходу фотоприймача у формат вхідних сигналів $U_{ВИХ НП} = U_{ВХ АЦП}$ аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Вихідний сигнал НП $U_{ВИХ НП}$ має параметри уніфікованого сигналу в діапазоні від $U_{ВИХ НП \min}$ до $U_{ВИХ НП \max}$. Вхідний сигнал НП $U_{ВХ НП}$ містить інформаційний сигнал і систематичний зсув (систематичну похибку). Ідея побудови математичної моделі і принципової схеми НП полягає в компенсації систематичного зсуву шляхом підключення на вхід підсилювача спеціального кола, джерела опорної напруги $E_{ОП}$. Система рівнянь, що описує роботу схеми НП має вигляд:

$$\begin{cases} U_{ВИХ НП \max} = U_{ВХ НП \max} \cdot K_U^+ + E_{ОП} \cdot K_U^-; \\ U_{ВИХ НП \min} = U_{ВХ НП \min} \cdot K_U^+ + E_{ОП} \cdot K_U^-, \end{cases} \quad (8)$$

де $U_{ВИХ НП \min}^{\max}$ та $U_{ВХ НП \min}^{\max}$ — діапазон зміни вихідної та вхідної напруги НП; K_U^+ , K_U^- — коефіцієнт підсилення по напрузі по неінвертуючому та інвертуючому входах НП. Тоді вихідна напруга НП розраховується по формулі:

$$U_{ВИХ НП}(C_{об\%}, T, P, l) = U_{ВХ НП}(C_{об\%}, T, P, l) \cdot K_U^+ + E_{ОП} \cdot K_U^-. \quad (9)$$

Нормовані характеристики перетворення вимірювача в діапазоні виміру концентрації метану від 0 до 4 $об\%$ при довжині аналізованої проби $l = 100 \text{ мм}$ та зміні дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери:

- температури газової суміші від $+5^\circ\text{C}$ до $+35^\circ\text{C}$ згідно вимогам [1] при атмосферному тиску $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$ приведено на рис. 2 а;
- атмосферного тиску від $87,8 \text{ кПа}$ до $119,7 \text{ кПа}$, згідно вимогам [1] при температурі $t_0 = +20^\circ\text{C}$, приведено на рис. 2 б.

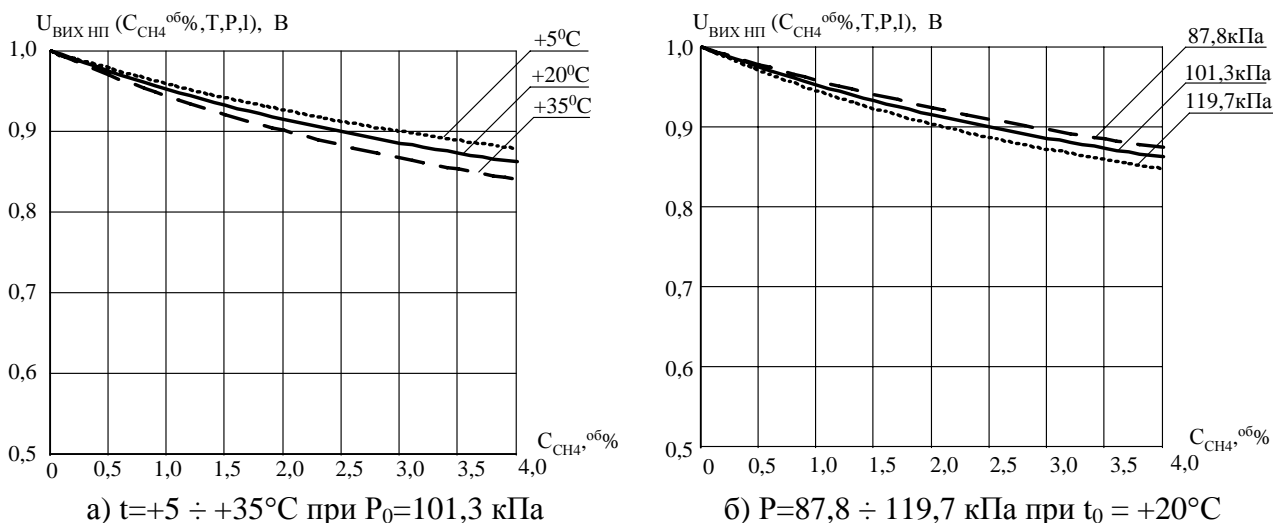


Рисунок 2 — Нормовані характеристики перетворення вимірювача концентрації метану в діапазоні від 0 до 4 $об\%$ при $l = 100 \text{ мм}$

Одержані характеристики перетворення мають неоднозначні значення при зміні дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери температури і тиску. Для отримання необхідних метрологічних характеристик робочого засобу виміру концентрації метану [1], необхідно враховувати зміну цих факторів та вносити корекцію в результати вимірювань.

Для зіставлення нормованої характеристики перетворення приведеної математичної моделі вимірювача розроблений макетний зразок ІВС контролю концентрації метану у вугільних шахтах, який складається з наступних блоків:

- схема драйверу СВД із системою термостатування ДВ;
- канал виміру концентрації метану;
- СВД LED-34-TEC-PR-1 та LED-29-TEC-PR-1;
- ФД PD36-03TEC-PR;
- закриті вимірювальні кювети з робочою довжиною траси 100, 150, 200 та 250 мм.

Результати вимірювань характеристик перетворення вимірювача приведені в табл. 1. На рис. 3 приведені експериментально визначенні характеристики перетворення макетного зразка, які відповідають різним довжинам вимірювальної траси. Для зіставлення характеристики між собою і з результатами моделювання (суцільні лінії на рис. 3) виконане нормування характеристик шляхом відношення вихідної напруги вимірювача при відповідній концентрації на діюче значення вихідної напруги макетного зразка вимірювача при концентрації метану 0 %.

Таблиця 1 — Характеристики перетворення макетного зразка вимірювача концентрації метану

Концентрація метану, C_{CH_4} , %	Діюче значення вихідної напруги, $U_{ВИХ}$, мВ					
	$l=100$ мм			$l=150$ мм		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
0	161,4	162,1	162,7	125,9	126,6	125,4
2,51	156,2	155,0	154,2	113,3	114,7	115,1
3,80	150,1	150,5	151,3	111,2	109,3	110,7
97,0	92,4	91,2	89,3	70,6	70,4	71,1

На рис. 3 приведені наступні позначення:

- серії вимірювань: ● — № 1; ✕ — № 2; + — № 3;
- ————— — результати математичного моделювання нормованої характеристики перетворення вимірювача концентрації метану.

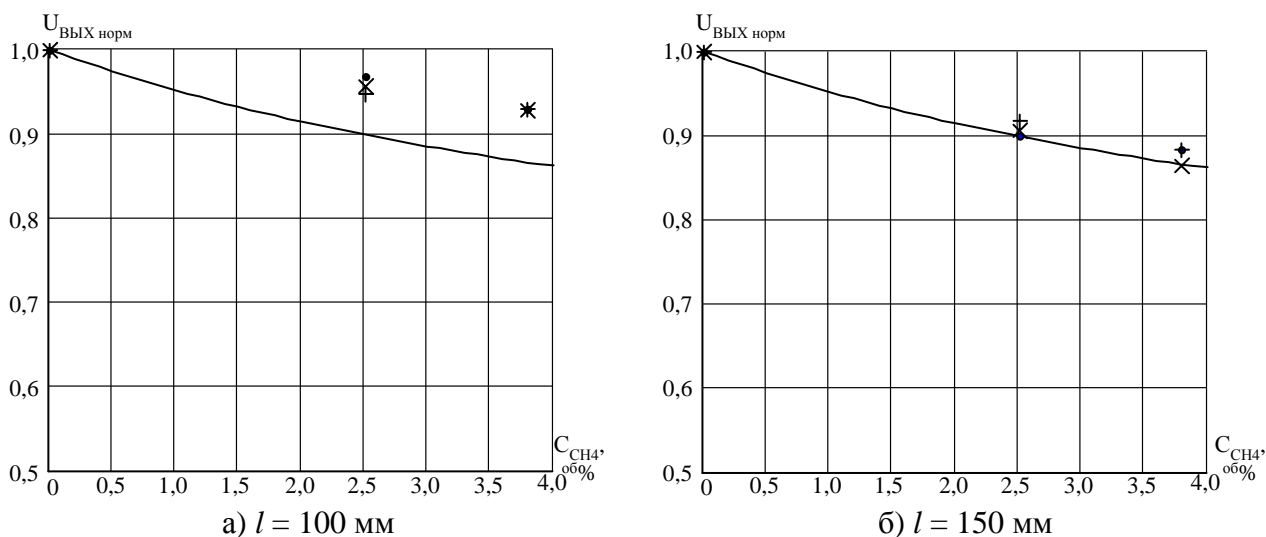


Рисунок 3 — Нормовані характеристики перетворення при зміні концентрації метану C_{CH_4} в діапазоні від 0 до 3,8 %

Абсолютне значення середньоквадратичної похибки виміру концентрації метану при діапазонах від 0 до 3,8 % та від 0 до 97 % розраховується по формулі:

$$\sigma[\Delta] = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (C_{CH_4 i} - C_{CH_4 i}^*)^2}, \tag{10}$$

де C_{CH_4i} — дійсне значення концентрації метану, одержане при математичному моделюванні вимірювача; $C_{CH_4i}^*$ — значення концентрації метану в i -ої експериментальній точці діапазону, розраховане по характеристиці перетворення вимірювача.

Згідно з співвідношенню (10), середньоквадратичне відхилення змінних значень характеристик перетворення від результатів математичного моделювання вимірювача концентрації метану не перевищує:

– 0,07 % у діапазоні виміру концентрації метану від 0 до 3,8 %,

– 0,25 % у діапазоні виміру концентрації метану від 0 до 97 %,

що підтверджує адекватність розроблених математичних моделей вимірювача концентрації метану.

Висновки.

1. Вперше розроблена математична модель вимірювальної системи, яка реалізовує оптико-абсорбційний метод контролю концентрації метану, та враховує дестабілізуючі фактори рудничної атмосфери: зміна температури і тиску, а також параметри оптичних та аналогових каналів вимірювача, що дозволяє з достатнім ступенем точності оцінити метрологічні характеристики вимірювальних каналів системи.

2. Розроблений макетний зразок вимірювача концентрації метану пройшов випробування в лабораторіях кафедри «Електронна техніка» Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет», а також у виробничих умовах Державного підприємства «Петровській завод вугільного машинобудування». Макетний зразок показав працездатність та підтвердив технічні показники, які визначають ступінь підвищення пропускну спроможності вимірювачів концентрації метану, за рахунок застосування розроблених методів та засобів. Макетний зразок прийнятий як базовий для розробки дослідного зразка ІВС контролю концентрації метану у вугільних шахтах ДП «Петровській завод вугільного машинобудування».

Література

1. ГОСТ 24032 – 80. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания. — Введ. 01.01.1981 /Межгосударственный стандарт. — М.: Издательство стандартов, 1980. — 36 с. — (Угольная промышленность).
2. Инфракрасный и газовый датчик ТХ6363 для зон группы I: I M1 EEx iad I SIRA 00 ATEX 2061X. Технические характеристики и параметры датчиков ТХ6363.01, ТХ6363.02, ТХ6363.03. Фирма Trolex, 2006. — 4 с.
3. Бреслер, П.И. Оптические абсорбционные газоанализаторы и их применение / П.И. Бреслер. — Л.: Энергия, 1980. — 164 с.
4. Справочник химика: в 6 т. Т. 4: Аналитический анализ, спектральный анализ, показатели преломления /Под. общ. ред. Б.П. Никольский. — Л.: Химия Ленингр. отд-ние. — 1967. — 920 с.
5. Вовна, А.В. Применение оптико-абсорбционного метода для измерения объемной концентрации метана в условиях угольных шахт / А.В. Вовна, М.Г. Хламов //Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація» — Донецьк, 2007. — Випуск 13(121). — С. 173–179.
6. Ioffe Physico-Technical Institute [Електронний ресурс] / Mid-IR Diode Optopair Group (MIRDOG). — Електронні дані. — Режим доступу: <http://mirdog.spb.ru>. — Дата доступу: вересень 2008. — Загл. з екрану.

Здано в редакцію:
24.02.2009р.

Рекомендовано до друку:
д.т.н, проф. Зорі А.А.