

АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 543.421 : 621.38

О. В. Вовна¹
А. А. Зорі¹

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОГРАМНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ОПТИЧНИХ ВИМІРЮВАЧІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ

¹Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

Розроблено та досліджено спосіб програмної компенсації впливу температури на метрологічні характеристики оптико-абсорбційного вимірювача концентрації газу. У лабораторних дослідженнях розробленого експериментального зразка вимірювача встановлено, що значення додаткової похибки вимірювання концентрації метану в діапазоні температур від +5 до +35 °С складає $\pm 0,15$ ⁰⁶%, що у 2,7 рази менше допустимого нормативного значення ($\pm 0,4$ ⁰⁶%) та повністю задовольняє вимоги, які висуваються до цих вимірювачів концентрації газових компонентів.

Ключові слова: вимірювач, концентрація, метан, похибка, компенсація, температура.

Вступ

Для вирішення проблем, пов'язаних з безпекою умов праці на промислових підприємствах, зокрема для попередження вибухонебезпечних ситуацій, необхідно постійно контролювати зміни складу атмосфери робочої зони. Оскільки для таких цілей одним із досконалих газоаналітичних вимірювачів концентрації метану є оптико-абсорбційний, то для покращення його метрологічних характеристик доцільно провести дослідження способів і засобів підвищення чутливості та точності вимірювача з урахуванням впливу домінуючого дестабілізуючого фактора — температури.

Метою роботи є підвищення точності вимірювального контролю концентрації метану шляхом розробки апаратно-програмного способу компенсації впливу температури на вихідний сигнал вимірювача, що дозволить істотно зменшити додаткову похибку вимірювання концентрації метану, зумовлену зміною цього домінуючого дестабілізуючого фактора.

Для досягнення мети поставлені та вирішені такі задачі:

- розробка експериментального зразка оптичного вимірювача концентрації метану та проведення його лабораторних досліджень;
- оцінка основної та додаткової похибок вимірювання концентрації метану;
- розробка способів і засобів апаратної та програмної компенсації впливу температури на зміну вихідного сигналу оптичного вимірювача;
- оцінка показників точності оптичного вимірювача концентрації метану з урахуванням розробленого способу компенсації впливу температури.

Результати розробок та досліджень

Державним вищим навчальним закладом «Донецький національний технічний університет» спільно з Приватною компанією «Дейта Експрес» (м. Донецьк, Україна) розроблений і створений експериментальний зразок швидкодійного оптико-абсорбційного вимірювача концентрації метану для вугільних шахт. Експериментальний зразок вимірювача побудований за диференціальною різницевою схемою [1], що дозволило введенням апаратної надмірності компенсувати запилення оптоелектронних компонент вимірювача. Як вимірювальний канал (ВК) використана оптична кювета типу Lms34LED–Lms36PD, вихідний сигнал якої залежить від концентрації вимірюваного газового компонента та запилення. Контрольний оптичний канал (КК) запропоновано виконати на основі оптоелектронної кювети типу Lms38LED–Lms43PD, зміна її вихідного сигналу від вимірюваної концен-

трації газового компонента в 7 разів менше [2], ніж для вимірювального каналу, при цьому зі зміною концентрації пилу КК має практично однакову чутливість з ВК.

Для розв'язання поставлених задач проведені лабораторні дослідження експериментального зразка вимірювача концентрації метану, які виконані у виробничих умовах лабораторії аерогазового захисту шахти ім. М. І. Калініна (м. Донецьк, Україна). Проведені дослідження вимірювача дозволили встановити чутливість за метаном $0,15\text{В}/0,6\%$ зі значенням абсолютної похибки вимірювання концентрації метану не більше $\pm 0,07\%$, що в 3 рази менше значення за вимогами ДСТУ [3] ($\pm 0,2\%$) у діапазоні вимірювань від 0 до 4% .

Під час проведення лабораторних досліджень вимірювача встановлено, що основним дестабілізуючим фактором, є вплив температури на показники точності вимірювача. При цьому значення додаткової похибки вимірювання концентрації метану від зміни температури в діапазоні від $+5$ до $+35\text{ }^\circ\text{C}$ в 40 разів перевищує значення основної похибки вимірювання концентрації метану. У зв'язку з цим запропоновано і розроблено апаратний спосіб компенсації температурного дрейфу вихідної напруги вимірювача [4—6]. В основу запропонованого способу апаратної компенсації покладена така ідея: використовувати як термочутливий елемент вимірювача — світлодіод, а як інформаційний сигнал — падіння напруги на ньому, яке практично лінійно змінюється від температури.

Для отримання значення основної похибки результатів вимірювання концентрації метану не більше $\pm 0,2\%$ [3] у діапазоні вимірювання від 0 до 4% виникла необхідність живлення світлодіода імпульсами струму. При цьому амплітуда імпульсів складає не більше 1 А, тривалістю 20 мкс та частотою імпульсів живлення 500 Гц. Для компенсації температури запропоновано вимірювати напругу на світлодіоді шляхом подачі додаткових імпульсів струму з амплітудою 12 мА, тривалістю 20 мкс з частотою імпульсної послідовності 500 Гц [7], що забезпечує мінімальний саморозігрів кристалу світлодіода. Під час проведення лабораторних досліджень з використанням термостату отримані характеристики перетворення напруги світлодіодів $U_{LED}(T)$ ВК (Lms34LED) та КК (Lms38LED) вимірювача від температури в діапазоні від $+5$ до $+35\text{ }^\circ\text{C}$, які запропоновано апроксимувати рівнянням

$$U_{LED}(T) = U_{0LED} + k_{LED} \cdot T, \quad (1)$$

де k_{LED} , U_{0LED} — коефіцієнти апроксимації для ВК та КК; T — температура.

Отримані два сигнали напруги на кожний із вимірювальних каналів: на виході синхронного детектора та напруги на світлодіоді, які масштабуються з подальшим відніманням та масштабуванням для цифрової обробки результатів вимірювань за співвідношенням

$$U_{ВИХ}(C_{CH_4}, T) = K_C (K_{LED}(U_{LED}(T) - U_{ЗС}) - U_{CD}(C_{CH_4}, T)), \quad (2)$$

де $U_{ВИХ}(C_{CH_4}, T)$ — вихідні напруги ВК та КК, величини яких залежать від зміни концентрації метану (C_{CH_4}) і температури (T); $U_{CD}(C_{CH_4}, T)$ — вихідні сигнали синхронних детекторів ВК та КК; K_C , K_{LED} — масштабні коефіцієнти, які виключають мультиплікативну складову похибки результатів вимірювання концентрації метану від температури; $U_{ЗС}$ — напруга зсуву, яка виключає адитивну складову похибки результатів вимірювання концентрації газу від температури.

Під час проведення лабораторних досліджень з використанням термостату отримані характеристики перетворення вихідних напруг ВК та КК вимірювача від температури в діапазоні від $+5$ до $+35\text{ }^\circ\text{C}$, які показано на рис. 1, де \times та $+$ — експериментальні дані вихідних напруг ВК та КК від температури; — та - - - - - — результати апроксимації характеристик перетворення вихідних напруг за температурою ВК та КК, відповідно.

Реалізуючи апаратний спосіб компенсації температурного дрейфу вимірювача концентрації метану, отримана нелінійна залежність (див. рис. 1) вихідних напруг ВК та КК від зміни температури в діапазоні від $+5$ до $+35\text{ }^\circ\text{C}$. Максимальне амплітудне значення зміни вихідної напруги ВК від зміни температури в цьому діапазоні складає не більше $\pm 0,4\text{ В}$. При цьому

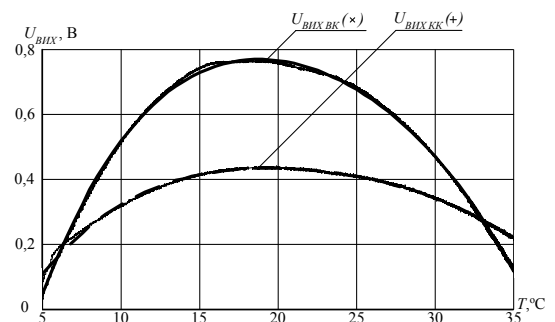


Рис. 1. Температурна залежність вихідних напруг ВК та КК оптичного вимірювача концентрації метану

значення додаткової похибки результатів вимірювань концентрації метану від температури складає $\Delta_{CH_4}^d = \Delta U_{ВИХ} / S_{CH_4} = \pm 0,4/0,15 = \pm 2,6$ об.%, що в 6,5 разів більше необхідного значення додаткової абсолютної похибки вимірювання концентрації метану, яку вказано в технічних характеристиках на розробку вимірювача ($\pm 0,4$ об.%). Таке значення додаткової похибки вимірювання, зумовлене зміною дестабілізуючих факторів рудничної атмосфери, не має перевищувати подвоєного значення основної похибки вимірювання ($\pm 0,2$ об.%).

Реалізація апаратного способу компенсації впливу температури на показники точності вимірювача концентрації метану дозволяє виконувати компенсацію в обмеженому діапазоні температур, наприклад від +20 до +35 °С. Під час експлуатації же вимірювачів концентрації метану в розширеному (робочому) діапазоні температур, наприклад, від +5 до +35 °С або (20 ± 15) °С, напруга на виході синхронного детектора та напруга на світлодіоді від температури істотно відрізняються одна від одної, що збільшує похибку вимірювання концентрації метану. Тому виникає задача розробки способу програмної компенсації температурного дрейфу оптичного вимірювача концентрації метану.

Одним з можливих шляхів розв'язання цієї задачі є введення до вимірювача додаткового каналу вимірювання температури. Інформація про зміну температури надходить до обчислювального блоку, в який заздалегідь занесені характеристики перетворення вихідних напруг ВК і КК від температури. За результатами вимірювань температури розраховують поправочні значення напруг, які віднімаються від результатів вимірювань вихідних напруг вимірювальних каналів. У реалізації даного способу, за рахунок різних постійних часу нагріву оптоелектронних компонент вимірювача та первинного перетворювача температури виникає додаткова динамічна похибка вимірювань, яка зумовлена зміною температури. Для компенсації цієї похибки вибирають первинний вимірювальний перетворювач температури таким, щоби його постійна часу дорівнювала постійній часу нагрівання оптоелектронних компонентів вимірювача. Інакше, якщо постійна часу первинного вимірювального перетворювача температури набагато менша постійної часу нагрівання оптоелектронних компонент вимірювача, то зміряне значення температури відрізняється на $(2...3)$ °С від значення температури світлодіода. При цьому виникає додаткова динамічна похибка вимірювання, яка має бути врахована під час налаштування вимірювальних каналів за зміни температури, що ускладнює налаштування та експлуатацію вимірювачів концентрації метану.

В основу запропонованого способу програмної компенсації впливу температури оптичного вимірювача концентрації метану покладено таку ідею: для компенсації зміни температури вихідних сигналів вимірювача використовувати той самий термочутливий елемент, як для апаратного, так і для програмного способів. Для реалізації апаратної компенсації температури використана напруга на світлодіоді, яка практично лінійно залежить від температури (1). Тому для реалізації програмного способу компенсації необхідно в цифровий блок вимірювача додатково ввести інформацію про зміну напруги на світлодіоді від зміни температури. При цьому для кожного вимірювального каналу необхідно додатково контролювати і вимірювати, окрім вихідної напруги вимірювального каналу $U_{ВИХ}(T, CH_4)$ напругу на світлодіоді $U_{LED}(T)$ з урахуванням масштабного коефіцієнта K_{LED} та напруги зсуву $U_{ЗС}$. Величина цієї напруги $U_{LED_K}(T) = K_{LED} \cdot (U_{LED}(T) - U_{ЗС})$ також лінійно змінюється від температури. У градуванні вимірювача за температурою необхідно під час налаштування та градування визначати відношення вихідної напруги синхронного детектора $U_{CD}(C_{CH_4} = 0^{об.}, T)$ до напруги $U_{LED_K}(T)$ за таким співвідношенням:

$$K_{ГР}(U_{LED_K}) = \frac{U_{CD}(C_{CH_4} = 0^{об.}, T)}{U_{LED_K}(T)} = \frac{U_{CD}(C_{CH_4} = 0^{об.}, T)}{K_{LED}(U_{LED}(T) - U_{ЗС})}. \quad (3)$$

Величини коефіцієнтів (3) мають бути менше одиниці у всьому діапазоні зміни температури. Інакше вихідна напруга вимірювального каналу на краях діапазону робочих температур буде негативною, що недопустимо для аналого-цифрового перетворення вихідної напруги вимірювального каналу. Для усунення цього обмеження використовуються підстроювання масштабного коефіцієнта K_{LED} та напруги зсуву $U_{ЗС}$.

Для реалізації запропонованого способу цифрової компенсації температури виконують розрахунок вихідної напруги вимірювального каналу за формулою

$$\Delta U_{\text{ВИХ}}(C_{\text{CH}_4}) = U_{\text{ВИХ}}(C_{\text{CH}_4}, T) + (K_{\text{ГР}}(U_{\text{LED}_K}) - 1)K_M U_{\text{LED}_K}(T), \quad (4)$$

де K_M — масштабний коефіцієнт, величина якого задається програмно і чисельно дорівнює K_C — коефіцієнту підсилення підсилювачів за апаратної компенсації температурного дрейфу.

Підставивши вирази (2) і (3) у формулу (4) та спростивши її, отримуємо вираз, за яким розраховують величини вихідних напруг ВК та КК у реалізації запропонованого способу цифрової компенсації температурного дрейфу вимірювача концентрації метану:

$$\Delta U_{\text{ВИХ}}(C_{\text{CH}_4}) = K_C (K_{\text{LED}}(U_{\text{LED}}(T) - U_{\text{ЗС}}) - U_{\text{CD}}(C_{\text{CH}_4}, T)) + \left(\frac{U_{\text{CD}}(C_{\text{CH}_4} = 0^{06}\%, T)}{K_{\text{LED}}(U_{\text{LED}}(T) - U_{\text{ЗС}})} - 1 \right) K_M K_{\text{LED}}(U_{\text{LED}}(T) - U_{\text{ЗС}}).$$

Спростуючи отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ВИХ}}(C_{\text{CH}_4}) &= U_{\text{ВИХ}}(C_{\text{CH}_4}, T) + (K_{\text{ГР}}(U_{\text{LED}_K}) - 1)K_M U_{\text{LED}_K}(T) = \\ &= K_M \cdot (U_{\text{CD}}(C_{\text{CH}_4} = 0^{06}\%, T) - U_{\text{CD}}(C_{\text{CH}_4}, T)). \end{aligned} \quad (5)$$

З виразу (5) випливає, що результуючі значення вихідної напруги ВК та КК практично не залежать від температури. Отримавши значення вихідних напруг ВК та КК $\Delta U_{\text{ВИХ}}(C_{\text{CH}_4})$, визначають вимірювану концентрацію газового компонента безпосередньо за характеристикою перетворення вимірювача за контрольованим газовим компонентом

$$C_{\text{CH}_4} = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{\Delta U_{\text{ВИХ}0}}{\Delta U_{\text{ВИХ}}(C_{\text{CH}_4})},$$

де $\Delta U_{\text{ВИХ}0}$ — діапазон зміни вихідної напруги вимірювального каналу; k — масштабний коефіцієнт характеристики перетворення вимірювача за концентрацією газу.

Для перевірки працездатності запропонованого способу проведені лабораторні дослідження експериментального зразка оптичного вимірювача концентрації метану з апаратно-програмною компенсацією температурного дрейфу. В результаті досліджень при $C_{\text{CH}_4} = 0^{06}\%$ отримана залежність зміни концентрації метану від температури в її робочому діапазоні від +5 до +35 °С, яку показано на рис. 2. З експериментальних даних визначена додаткова абсолютна похибка вимірювання концентрації метану в діапазоні температур від +5 до +35 °С, значення якої склало $\pm 0,15^{06}\%$, що в 2,7 рази менше необхідного значення додаткової абсолютної похибки вимірювання концентрації метану ($\pm 0,4^{06}\%$) та повністю задовольняє умовам експлуатації таких вимірювачів концентрації метану.

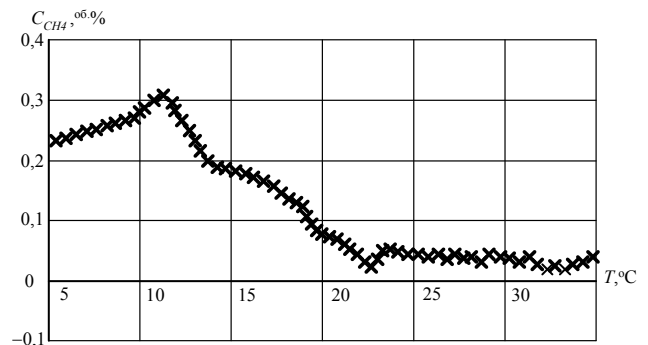


Рис. 2. Зміна вихідного сигналу вимірювача концентрації метану при $C_{\text{CH}_4} = 0^{06}\%$ в діапазоні температур від +5 до +35 °С

Висновки

1. Розроблений та досліджений експериментальний зразок оптичного вимірювача концентрації метану, який забезпечує необхідний час спрацьовування за об'ємною часткою метану не більшою 0,8 с з основною абсолютною похибкою вимірювань не більше $\pm 0,07^{06}\%$, що в 3 рази менше значення за вимогами ДСТУ ($\pm 0,2^{06}\%$) у діапазоні від 0 до 4 $^{06}\%$.

2. Під час проведення лабораторних досліджень розробленого експериментального зразка вимірювача встановлено, що основним дестабілізуючим фактором є вплив температури на значення результатів вимірювання. При цьому значення додаткової абсолютної похибки вимірювання

концентрації метану за зміни температури в діапазоні від +5 до +35 °С в 40 разів перевищує значення основної абсолютної похибки вимірювання концентрації метану.

3. Розроблено та досліджено спосіб апаратної компенсації впливу температури оптичного вимірювача. У лабораторних дослідженнях вимірювача з апаратною реалізацією запропонованого способу встановлено, що значення додаткової абсолютної похибки результатів вимірювань концентрації метану від зміни температури склало $\pm 2,6^{06}\%$, що в 6,5 разів перевищує необхідне значення додаткової абсолютної похибки вимірювання концентрації метану, яке вказано в технічних характеристиках на розробку вимірювача ($\pm 0,4^{06}\%$).

4. Запропонований, розроблений та досліджений спосіб апаратно-програмної компенсації впливу температури для оптичних вимірювачів концентрації газів. В процесі лабораторних досліджень встановлено, що значення додаткової абсолютної похибки вимірювання концентрації метану при $C_{CH_4} = 0^{06}\%$ в діапазоні температур від +5 до +35 °С склало $\pm 0,15^{06}\%$, що в 2,7 рази менше допустимого нормативного значення додаткової абсолютної похибки вимірювання концентрації метану ($\pm 0,4^{06}\%$) та повністю задовольняє вимогам до таких вимірювачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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 «Донецький національний технічний університет» (Україна). — № а200906379; заявл. 19.06.2009; опубл. Бюл. № 8 від 25.08.2010.
2. Вовна А. В. Методы и средства аналитического измерения концентрации газовых компонент и пыли в рудничной атмосфере угольных шахт / А. В. Вовна, А. А. Зорі, М. Г. Хламов [та ін.]. — Донецьк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. — 260 с.
3. Приборы шахтные газоаналитические. Общие требования, методы испытания: ДСТУ ГОСТ 24032:2009. — [Действующий от 2009–02–01]. — К. : Держспоживстандарт, 2009. — 24 с.
4. Вовна А. В. Способ компенсации температурного дрейфа оптического измерителя концентрации газа / А. В. Вовна, А. А. Зорі // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении». — Таганрог, 2013. — № 5 (142). — С. 165—170.
5. Пат. 82534 U. Україна, МПК G 01 N 21/35. Спосіб вимірювання концентрації газів / О. В. Вовна, А. А. Зорі, В. Д. Коренев, М. Г. Хламов ; Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» (Україна). — № u201304754; заявл. 15.04.2013; опубл. Бюл. № 15 від 12.08.2013.
6. Пат. 84219 U. Україна, МПК G 01 N 21/00. Пристрій для вимірювання концентрації газів / О. В. Вовна, А. А. Зорі, В. Д. Коренев, М. Г. Хламов; Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» (Україна). — № u201305529; заявл. 29.04.2013; опубл. Бюл. № 19 від 10.10.2013.
7. Вовна А. В. Разработка и исследование измерителя концентрации метана с апаратной компенсацией температуры / А. В. Вовна, А. А. Зорі, И. Я. Лизан // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». — Донецьк, 2013. — Вип. 1 (24). — С. 222—229.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.06.2014

Вовна Олександр Володимирович — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри електронної техніки, e-mail: Vovna_Alex@ukr.net;

Зорі Анатолій Анатолійович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електронної техніки, e-mail: zori@kita.dgtu.donetsk.ua.

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк

O. V. Vovna¹
A. A. Zori¹

Application of software temperature influence compensation to optical meters of gas concentration

¹State Higher Educational Establishment «Donetsk National Technical University»

The temperature influence on the metrological characteristics of optical absorption of gas concentration meter and temperature software compensation method is developed and researched in the paper. During laboratory researches of developed experimental prototype meter there has been found that the value of the methane concentration measuring additional error in the temperature range from +5 to +35 °С is not more than $\pm 0,15^{vol}\%$, which is 2.7 times

less than the required value according to GOST ($\pm 0,4^{vol}\%$) and it is fully compliant to the requirements of the data for gas components concentration measuring.

Keywords: meter, concentration, methane, error, compensation, temperature.

Vovna Oleksandr V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Post-Doctoral Student of the Chair of Electronic Engineering, e-mail: Vovna_Alex@ukr.net;

Zori Anatolii A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electronic Engineering, e-mail: zori@kita.dgtu.donetsk.ua

А. В. Вовна¹
А. А. Зори¹

Применение программной компенсации влияния температуры для оптических измерителей концентрации газов

¹Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

Разработан и исследован способ программной компенсации влияния температуры на метрологические характеристики оптико-абсорбционного измерителя концентрации газа. В лабораторных исследованиях разработанного экспериментального образца измерителя установлено, что значение дополнительной погрешности измерения концентрации метана в диапазоне температур от +5 до +35 °С составляет не более $\pm 0,15^{об}\%$, что в 2,7 раза меньше чем необходимое значение согласно ГОСТ ($\pm 0,4^{об}\%$) и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к этим измерителям концентрации газовых компонентов.

Ключевые слова: измеритель, концентрация, метан, погрешность, компенсация, температура.

Вовна Александр Владимирович — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры электронной техники, e-mail: Vovna_Alex@ukr.net;

Зори Анатолий Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электронной техники, e-mail: zori@kita.dgtu.donetsk.ua