

## АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІНФРАЧЕРВОНИХ СЕНСОРІВ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

<sup>1</sup>Вінницький Національний Технічний Університет

### Анотація

На підставі аналізу експериментальної функції перетворення запропоновано адаптивний алгоритм суттєвого зменшення адитивної складової похибки інфрачервоних сенсорів, що перетворюють неелектричну величину концентрацію вуглекислого газу в електричну – постійну напругу. Встановлено, що значення цієї складової похибки може сягати на початку діапазону вимірювання неприйнятних значень (25%). Показано, що використання методу поправок, забезпечує суттєве зменшення впливу адитивної похибки на результати вимірювань інформативного параметру.

**Ключові слова:** концентрація вуглекислого газу, інфрачервоний сенсор, функція перетворення, емпірична і апроксимована статичні характеристики

### Abstract

Based on the analysis of the experimental transformation function, an adaptive algorithm for significant reduction of the additive component of the error of infrared sensors that convert the non-electrical value of carbon dioxide concentration into electrical - constant voltage is proposed. It has been established that the value of this component of the error can reach at the beginning of the range of measurement of unacceptable values (25%). It is shown that the use of the correction method provides a significant reduction in the impact of additive error on the results of measurements of the informative parameter.

**Keywords:** Keywords: carbon dioxide concentration, infrared sensor, conversion function, empirical and approximated static characteristics.

### Вступ

Сенсори вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), як первинні вимірювальні перетворювачі неелектричної величини в електричну, є основним елементом сучасних комп'ютеризованих систем вимірювань і контролю якості повітря в промисловості, сільському господарстві, охороні навколишнього середовища, аерокосмічній, медичній та інших галузях. Інфрачервоним сенсорам поглинання [1-3], порівняно з відомим, притаманні суттєві переваги: висока чутливість, надійність, швидкодія, стабільність параметрів і експлуатаційна довговічність. Тому, надзвичайно актуальною вже на стадії розробки є задача аналізу та вибору математичної моделі для попереднього оцінювання основних статичних метрологічних характеристик засобу вимірювання.

В теперішній час дослідникам-метрологам доступні як нелінійні, так і лінійні математичні моделі що адекватно описують основну метрологічну операцію вимірювального перетворення концентрації CO<sub>2</sub> у постійну напругу інфрачервоними сенсорами. Основну, тому що точність виконання цієї вимірювальної процедури в основному і визначає клас точності засобів вимірювань і контролю даного інформативного параметру. Аналіз відомих моделей [4], що покладено в основу побудови інфрачервоних сенсорів, мають не ідеальну статичну характеристику. Не ідеальність характеристики полягає в тому, що нульовому значенню концентрації  $P=0$  [ppm] на вході сенсорів даного типу відповідає відмінне від нуля  $U \neq 0$  [В] значення напруги на його виході. Отже, вже в теорії, яка подана функцією перетворення, присутня адитивна похибка (похибка нуля).

**Метою** є підвищення точності інфрачервоних сенсорів в процесі вимірювального перетворення концентрації вуглекислого газу у вихідну напругу шляхом автоматичного вилучення адитивної похибки із результатів вимірювань методом поправок.

**Об'єктом дослідження** є процес вимірювального перетворення вхідної неелектричної величини концентрації вуглекислого газу в електричну величину – напругу на виході інфрачервоного сенсора.

**Предметом дослідження** є методи та інфрачервоні засоби вимірювального контролю концентрації вуглекислого газу.

## Основна частина

Теоретичним підґрунтям для практичної реалізації інфрачервоних вимірювальних перетворювачів концентрації вуглекислого газу в електричну величину є закон Бугера-Ламберта-Бера [1,4]

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot P}. \quad (1)$$

Аналіз (1) показує, що при нульовому значенні концентрації ( $P=0$ ) вуглекислого газу, значення інтенсивності світла  $I$  що потрапляє на детектор не дорівнює нулю  $I \neq 0$ , а відповідає певному значенню  $I_0$  – інтенсивності світла, виміряній при порожній камері. Отже, в самій теоретичній функції перетворення вже закладена адитивна складова похибки. Виходячи з цього, в якості апроксимуючої залежності [5] необхідно обрати поліном першого порядку такого виду

$$U = -a + b \cdot P, \quad (2)$$

де  $a$  – адитивна похибка (похибка нуля);

$b$  – мультиплікативна похибка (похибка чутливості);

$U$  – вихідна величина (напруга на виході сенсора);

$P$  – вхідна величина (вимірювана концентрація).

Оцінимо, як впливає на точність вимірювального перетворення адитивна похибка. Експериментальні дослідження для отримання емпіричної статичної характеристики проведено на прикладі сенсора NDIR EE872. Концентрація вуглекислого газу на вході сенсора змінювалась в діапазоні від 200 до 10000 [ppm], а відповідні їй зміни постійної напруги на його виході від 0 до 5 [В]. Результати фізичного моделювання зведено в таблицю, в якій 12-ти значенням концентрації відповідають 12-ть значень напруги. Табличне подання залежності  $P = f(U)$  називають градуальною характеристикою, а її графічне подання – експериментальною статичною характеристикою. Апроксимацію [5] результатів експерименту здійснено в середовищі програмного забезпечення NUMERI, що адаптовано до Windows драйвером DOSBox 0.74-3. В результаті отримано такі числові значення коефіцієнтів полінома (2):

$$a = -0.05 \text{ [В]}; \quad b = +0.0005 \text{ [1/ppm]}. \quad (3)$$

З врахуванням (2), емпірична функція перетворення приймає такий остаточний вигляд

$$U = -0.05 + 0.0005 \cdot P. \quad (4)$$

Графічне подання рівняння перетворення (4) будемо називати апроксимованою статичною характеристикою. Експериментальні дослідження підтверджують наявність адитивної похибки в процесі вимірювального перетворення концентрації вуглекислого газу у вихідну напругу сенсора, значення якої для даного типу сенсора дорівнює -0.05 [В]. Якщо в результати вимірювання ввести поправку +0.05 В

$$U = -0.05 + (+0.05) + 0.0005 \cdot P, \quad (5)$$

то отримаємо скореговану статичну характеристику.

Одночасне подання (рис.1) двох характеристик (скорегованої і апроксимованої) на одному графіку

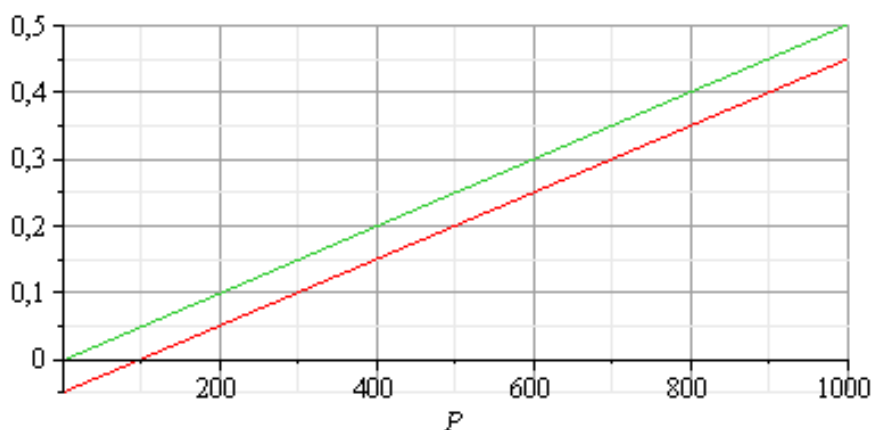


Рисунок 1 – Апроксимована (червона) і скорегована (зелена) статичні характеристики сенсора

дозволяє оцінити відносну похибку впливу адитивної складової на результати вимірювань

$$\delta_a = \frac{U_a - U_k}{U_k} \cdot 100\%,$$

де  $U_a$  – значення напруги апроксимованої характеристики;

$U_k$  – значення напруги скорегованої характеристики.

Аналіз відносної похибки показує, що її значення можуть досягати на початку діапазону вимірювання неприйнятних значень (25%). Тому, адитивну похибку необхідно вилучати з результатів вимірювань. Пропонується наступний автоматизований алгоритм корегування адитивної похибки, притаманної інфрачервоним сенсорам концентрації  $CO_2$ :

1. Оскільки статична характеристика сенсора лінійна, то для побудови лінії достатньо отримати дві точки. Спочатку необхідно отримати координати першої точки  $[P_1, U_1]$ , а через певний проміжок часу координати другої точки  $[P_2, U_2]$ .

2. Мінімальне значення проміжку часу  $t_B$  між двома сусідніми вимірюваннями повинно перевищувати значення кроку дискретизації [5-6]

$$t_B \geq T_D,$$

де  $T_D = T_T \cdot 2^n$  – крок дискретизації,

$T_T = 1/f_T$  – період тактової частоти  $f_T$ ,

$n$  – розрядність двійкового лічильника.

3. Апроксимувати результати вимірювань і отримати значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$  (3) для поліному (4).

4. За (5) ввести поправку в результати вимірювань.

#### **Висновки:**

В результаті аналізу теоретичної і експериментальної функцій перетворення інфрачервоних сенсорів встановлено, що під час вимірювального перетворення неелектричної величини концентрації вуглекислого газу в електричну (постійну напругу) має місце адитивна похибка. Встановлено, що значення цієї складової похибки може сягати на початку діапазону вимірювання неприйнятних значень (25%). Запропоновано автоматизований алгоритм корегування адитивної похибки, який здійснюють безпосередньо в процесі моніторингу концентрації  $CO_2$  в режимі реального часу що дозволяє зменшити її практично до нуля.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Теоретичні основи та використання NDIR. Режим доступу до ресурсу: [https://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/TechnicalNote-169\\_Theory-And-Operation-Of-NDIR-Sensors\\_04-02\\_RU.pdf](https://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/TechnicalNote-169_Theory-And-Operation-Of-NDIR-Sensors_04-02_RU.pdf)
2. Недисперсійний інфрачервоний аналізатор. Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
3. Система NDIR на основі MEMS для моніторингу вуглекислого газу. Режим доступу до ресурсу: <https://www.researchgate.net/publication/>
4. Кухарчук В.В., Кучанський В. С. Математична модель вимірювального перетворення вуглекислого газу інфрачервоними сенсорами генераторного типу // The 7th International scientific and practical conference “Science and technology: challenges, prospects and innovations” (February 26-28, 2025) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2025. 412 p. ISBN 978-4-9783419-4-5
5. Кухарчук В. В., Коваль А. М.. Методи та засоби перетворення інформації: електронний лабораторний практикум комбінованого (локального та мережевого) використання [Електронний ресурс.- Вінниця : ВНТУ, 2023. – 176 с.
6. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Володарський Є.Т., Грабко В.В.. Основи метрології та електричних вимірювань : Підручник: – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2013. – 538 с.

**Кучанський Владислав Сергійович**, студент групи ЕПА-23мз, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [prikol490@gmail.com](mailto:prikol490@gmail.com)

**Кухарчук Василь Васильович** – доктор техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, ел. пошта: [BKuch@ukr.net](mailto:BKuch@ukr.net)

Науковий керівник: **Кухарчук Василь Васильович** – доктор техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Kuchansky Vladyslav S.**, student of group EPA-23mz, Faculty of Electric Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [prikol490@gmail.com](mailto:prikol490@gmail.com)

**Kukharchuk Vasyly Vasylovych** – Doctor of Science, Professor, Professor of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, e-mail. mail: [BKuch@ukr.net](mailto:BKuch@ukr.net)

Scientific advisor: Kukharchuk Vasyly Vasylovych – Doctor of Science, Professor, Professor of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.