

УДК 621.311.25

Й. Й. Білінський, д. т. н., проф.; Б. П. Книш; О. А. Павлюк

ІНФРАЧЕРВОНІЙ ДВОХВИЛЬОВИЙ СЕНСОР КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ

У статті розглянуто математичну модель сенсора концентрації газу. Наведено його оптичну схему, принцип роботи та результати моделювання.

Ключові слова: інфрачервоний двохвильовий сенсор, концентрація, контроль, кювета, випромінювання, газ, домішки.

Вступ

На сьогодні в багатьох галузях техніки використовують різноманітні методи дослідження фізичних параметрів газу. Вони дозволяють визначити густину й концентрацію, вміст шкідливих домішок, кількісний склад газу. Одним із параметрів газу є його концентрація. Так, газоаналізатори українських підприємств – ТОВ «Екотест» (м. Харків), ВАТ «Аналітприлад» (м. Київ), НПП «Оріон» (м. Харків), «Антекс» (м. Сєверодонецьк) – призначені переважно для роботи на підприємствах, оскільки не забезпечують належний рівень чутливості й точності вимірювань. Наприклад, газоаналізатор ОКСИ дозволяє контролювати концентрацію оксиду азоту в межах часток міліграма на 1 м³ повітря при ГДК_{NO} = 40 мкг/м³ для житлових приміщень. До того ж, відносна похибка вимірювань деяких газоаналізаторів сягає 25 % [1 – 3].

У багатьох випадках основним недоліком сенсорів концентрації газу, такого як: азот, метан, етан тощо, є низька точність вимірювального контролю, оскільки відсутня можливість компенсації дестабілізуючих чинників і показників, які характеризують адіабатний процес. У зв'язку з цим постає завдання підвищення точності вимірювального контролю сенсорів шляхом урахування адіабатичного процесу.

Основна частина

В основі роботи сенсора лежить метод абсорбційної спектрометрії, який ґрунтується на поглинанні частинками газу світлового випромінювання та реєстрації частки поглинутого випромінювання. При цьому кожен газ має свій унікальний спектр поглинання й максимум цього поглинання припадає на відповідні довжини хвиль для різних газів. Використовуючи випромінювання певної довжини хвилі, можна визначити концентрацію відповідного компонента з високою точністю, оскільки застосовано явище вибіркового поглинання багатоатомними молекулами випромінювання під час його проходження через середовище. Вибіркове поглинання можна пояснити тим, що воно відбувається на тих хвилях, частота яких є резонансною для відповідних молекул [4].

Якщо через газ, який аналізують, проходить паралельний пучок випромінювання з інтенсивністю $I_0(\nu)$, то частина випромінювання поглинається. Загалом поглинання відбувається за законом Бугера – Ламберта – Бєра [5]

$$I(\nu) = I_0(\nu)e^{-K(\nu)Cd}, \quad (1)$$

де $K(\nu)$ – показник поглинання, що є функцією частоти ν і залежить від природи речовини; C – молярна концентрація газу, яку контролюють; d – товщина шару газу.

Густина газової суміші $\rho_{Г.С.}$ загалом визначають як суму густин чистого, тобто відомого, газу $\rho_{Г.}$ і домішок у ньому $\rho_{Д.}$ при їх парціальних тиску і температурі

$$\rho_{Г.С.} = \rho_{Г.} + \rho_{Д.}.$$

Оскільки поглинання випромінювання відбувається як за рахунок впливу чистого, тобто відомого, газу, так і за рахунок домішок у ньому, лише різною мірою, то модель перенесення випромінювання в такому середовищі може бути представлена як у [4]. Ураховуючи при цьому, що молярна концентрація речовини пропорційна його густині $C = \rho/\mu$, закон Бугера – Ламберта – Бера набуде вигляду

$$I_{Г.С.}(v) = I_0(v) e^{-d \left(K^{Г.}(v) \frac{\rho_{Г.}}{\mu_{Г.}} + K^{Д.}(v) \frac{\rho_{Д.}}{\mu_{Д.}} \right)}, \quad (2)$$

де $K^{Д.}(v)$ і $K^{Г.}(v)$ – молярні питомі показники поглинання домішок та відомого газу на частоті v відповідно; $\mu_{Д.}$ і $\mu_{Г.}$ – молярні маси домішок і відомого газу відповідно.

Оскільки концентрацію домішок газу визначають з відношення $c = \frac{\rho_{Д.}}{\rho_{Г.} + \rho_{Д.}}$, то густину

домішок за робочих умов визначають як $\rho_{Д.} = \frac{c\rho_{Г.}}{1-c}$.

За умов тиску газу, близького до 10^5 Па, та малих густинах, властивості його близькі до властивостей ідеального і їх можна описати рівнянням Клапейрона – Менделєєва

$$pV = \frac{mRT}{\mu},$$

де p , V , m , μ , T – тиск, об'єм, маса, молярна маса та температура газу відповідно; R – універсальна газова стала.

Густину газу за робочих умов визначають, коли $P = P_{(c)}$ і $T = T_{(c)}$ згідно з відношенням

$$\rho_{Г.} = \frac{P \cdot \rho_{(c)} \cdot T_{(c)}}{T \cdot P_{(c)}}, \quad (3)$$

де $\rho_{(c)}$ – густина чистого газу в ідеальному газовому стані.

Тоді густину домішок за робочих умов переписують

$$\rho_{Д.} = \frac{c \cdot P \cdot \rho_{(c)} \cdot T_{(c)}}{(1-c)T \cdot P_{(c)}}. \quad (4)$$

Використовуючи вираз (3) та (4), закон Бугера – Ламберта – Бера для газу за робочих умов перепишемо у вигляді

$$I_{Г.С.}(v_1) = I_0(v_1) e^{-d \left(K^{Г.}(v_1) \frac{P \cdot \rho_{(c)} \cdot T_{(c)}}{\mu_{Г.} \cdot T \cdot P_{(c)}} + K^{Д.}(v_2) \frac{c \cdot P \cdot \rho_{(c)} \cdot T_{(c)}}{\mu_{Д.} \cdot (1-c) \cdot T \cdot P_{(c)}} \right)}. \quad (5)$$

Недолік такої моделі – наявність молярної маси газу, оскільки вона в цьому випадку є величиною змінною і залежить від складу газу. Для усунення цього недоліку в роботі запропоновано двохвильову модель, яка дозволяє знехтувати молярною масою газу й компенсувати показники адіабати. При цьому світлові хвилі налаштовані так, що перша має найбільш виражені поглинаючі властивості стосовно домішок газу, а друга – найменш

виражені поглинаючі властивості щодо до цих домішок.

Закон Бугера – Ламберта – Бера для другої довжини хвилі як для відомого газу можна записати

$$I_{Г.С.}(v_2) = I_0(v_2) e^{-dK^Г(v_2) \frac{P(c) \cdot T(c)}{\mu_{Г.Т} \cdot P(c)}} \quad (6)$$

На основі системи рівнянь (5) і (6) отримаємо концентрацію домішок газу

$$c = \frac{\ln \frac{I_{Г.С.}(v_1)}{I_0(v_1)} - \frac{K^Г(v_1)}{K^Г(v_2)} \cdot \ln \frac{I_{Г.}(v_2)}{I_0(v_2)}}{\ln \frac{I_{Г.С.}(v_1)}{I_0(v_1)} - \frac{K^Г(v_1)}{K^Г(v_2)} \cdot \ln \frac{I_{Г.}(v_2)}{I_0(v_2)} - K^Д(v_1) \cdot \frac{d \cdot T(c) \cdot P(c)}{\mu_{Д.Т} \cdot P(c)}} \quad (7)$$

Графік залежності концентрації домішок газу (7) від інтенсивності світла при значенні робочих умов, що відповідають стандартним, виконано в середовищі Mathcad і зображено на рис. 1. Коефіцієнти поглинання газу $K^Д(v)$ і $K^Г(v)$ взято з [4]. Із графіка випливає, що залежність концентрації домішок газу від інтенсивності має експоненціальний характер. При цьому вплив відомого газу має місце, хоча він і незначний.

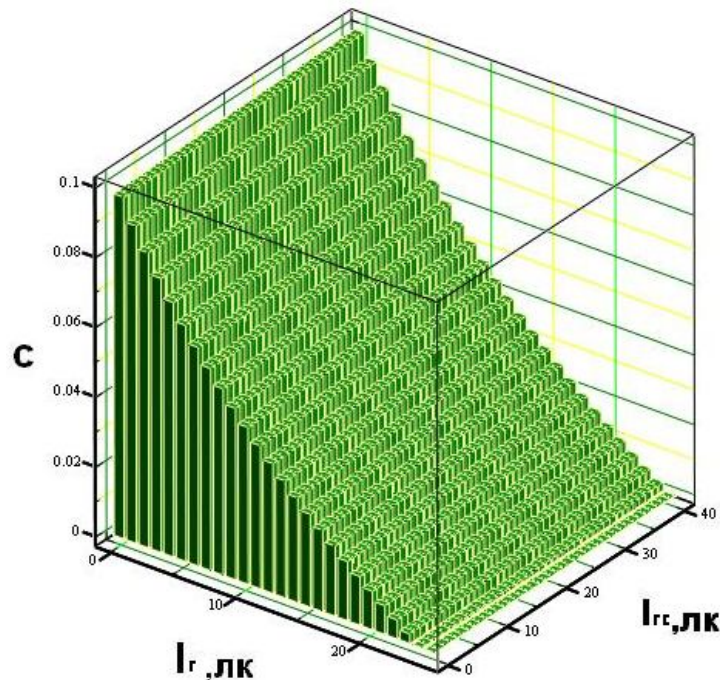


Рис. 1. Графік залежності концентрації домішок газу від інтенсивності випромінювання

На рис. 2 наведено схему оптичного двоххвильового сенсора концентрації газу, що складається з двох кювет – робочої 1, у якій міститься газова суміш, та опорної 2, у якій міститься відомий газ.

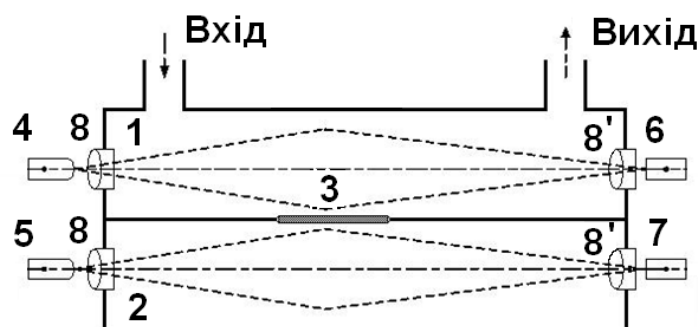


Рис. 2. Схема оптичного сенсора концентрації газу:

1 – робоча кювета; 2 – кювета з опорним газом; 3 – діафрагма; 4, 5 – джерела випромінювання вимірювального та опорного каналів відповідно; 6, 7 – виходи приймачів випромінювання вимірювального та опорного каналів відповідно; 8 і 8' – оптичні системи

Аналізований газ прокачується через вхідний патрубок робочої кювети 1. Джерела інфрачервоного випромінювання вимірювального 4 та опорного 5 каналів формують світлові потоки, які проходять спочатку через вхідні оптичні системи 8 для розсіювання світлових потоків, а потім через аналізований газ, який тисне на діафрагму 3 кювети з опорним газом 2, у робочій кюветі 1 і опорний газ кювети 2 відповідно, та потрапляють на вихідні оптичні системи 8' для збирання світлових потоків, а потім на приймачі інфрачервоного випромінювання вимірювального каналу 6 та опорного каналу 7 [6, 7].

Для підтвердження роботи сенсора проведено моделювання його схеми за допомогою пакету наскрізного схемотехнічного проектування OrCAD [8, 9], яке наведено на рис. 3.

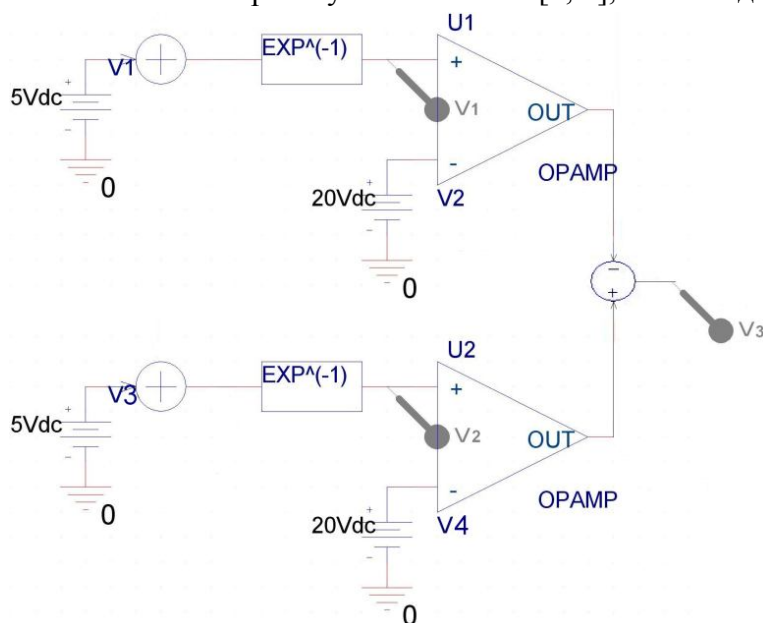


Рис. 3. Змодельована схема сенсора

Схему моделювання сенсора представлено у вигляді двох каналів, сигнали на виході яких порівнюють.

Результати моделювання наведено на рис. 4.

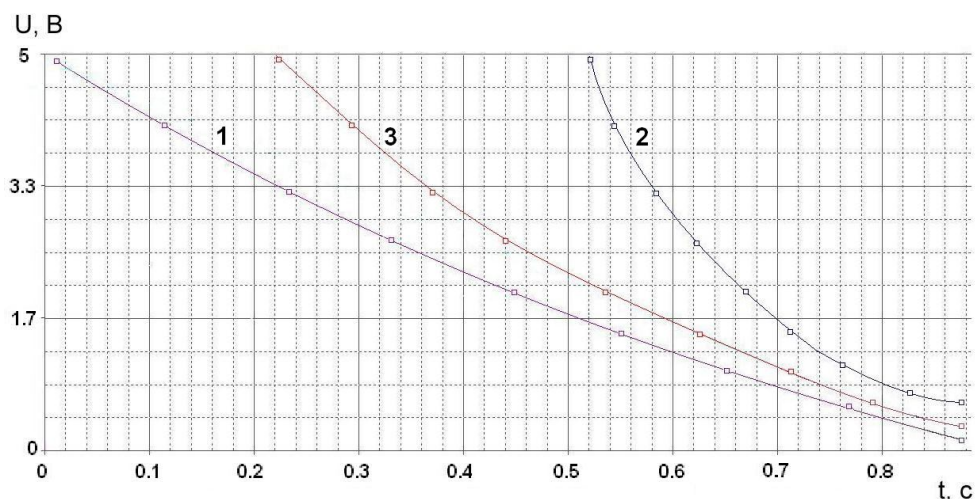


Рис. 4. Вихідні характеристики сенсора: 1 – після експоненціатора першого каналу; 2 – після експоненціатора другого каналу; 3 – на виході схеми

Як видно з графіка, усі залежності мають експоненціальний характер, що відповідає теоретичним дослідженням. Вихідна характеристика, що представляє собою різницю сигналів першого та другого каналів також є експоненціальною, але більш лінійною.

Отже, експериментально підтверджено результати математичного апарату, який описує залежність концентрації домішок газу від інтенсивності світла, що проходить крізь газову суміш. Усі вони мають експоненціальний характер.

Висновок

Запропоновано інфрачервоний двохвильовий сенсор концентрації газу зі спеціальною діафрагмою, що дозволяє підвищити точності вимірювань унаслідок компенсації дії показників адиабати та дестабілізуючих чинників. За допомогою моделювання експериментально підтверджено експоненціальну залежність концентрації домішок газу від інтенсивності світла, що проходить крізь газову суміш.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Офіційна web-сторінка ТОВ «Екотест» [Електронний ресурс] : Ukrainian Context Optimizer. – Режим доступу : <http://www.ecotest.kharkov.ua>.
2. Офіційна web-сторінка НПП «Оріон» [електронний ресурс] : Ukrainian Context Optimizer. – Режим доступу : <http://www.orion.com.ua>.
3. Книш Б. П. Універсальна класифікація оптичних методів дослідження густини газу / Б. П. Книш, Й. Й. Білинський, В. В. Онушко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010.– № 4. – С. 23 – 26.
4. Білинський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й. Й. Білинський, В. В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 5. – С. 18 – 22.
5. Бугера-Ламберта-Бера закон [Електронний ресурс] : Ukrainian Context Optimizer. – Режим доступу: http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0388.html.
6. Пат. 2134874 Российская Федерация, МПК⁶ G01N 21/61. Устройство для измерения концентрации газа / Белогуров Д. А.; Хиврин М. В.; Пошехонов А. С.; заявник та патентовласник Государственный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по автоматизации угольной промышленности «Гипроуглеавтоматизация» – № 96123856/25; заявл. 19.12.96; опубл. 20.08.99.
7. Пат. 89707 Україна, МПК⁹ H01L 33/00, H01L 27/15, G01N 21/01. Оптичний сенсор газів / заявник та патентовласник Кабацій В. М.; Блецкан Д. І.; Гасинець В. О. – № a200807108; заявл. 22.05.08; опубл. 25.02.10, Бюл. № 4.
8. Бадулин С. С. Автоматизированное проектирование цифровых устройств / С. С. Бадулин. – М.: Радио и связь, 1991. – 325 с.

9. Предко М. Д. Справочник по РСІ-микроконтроллерам / М. Д. Предко. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 512 с.

Білинський Йосип Йосипович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електроніки.

Книш Богдан Петрович – студент кафедри електроніки.

Павлюк Олександр Анатолійович – студент кафедри електроніки.
Вінницький національний технічний університет.