

УДК 621.375; 543.272

В. Ф. Яремчук, канд. техн. наук, доц.;

Н. С. Кравчук, канд. техн. наук, доц.;

С. М. Смішний, асп.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ

Подано результати розрахунку основних характеристик волоконно-оптичного сенсора концентрації газу, що використовує принцип диференціального оптичного поглинання випромінювання та принцип оптично-абсорбційного методу в діапазоні різних довжин хвиль залежно від параметрів використаних компонентів. Обговорено основні принципи побудови і роботи волоконно-оптичної вимірювальної системи, призначених для моніторингу екологічного стану середовища.

### Вступ

Екологічна безпека складається з двох компонентів — природної та техногенної безпеки, які виступають у тісній взаємодії. Існуюча або прогнозована екологічна ситуація в державі повинна забезпечити нормальне функціонування природних і техногенних систем, збереження здоров'я населення і генофонду нації.

Для оцінки екологічного стану довкілля потрібно, перш за все, одержувати інформацію про зміну всіх екологічних показників, що характеризують стан екосистем на певний час спостережень.

Отримання достовірної екологічної інформації про динаміку зміни кожної компоненти екосистеми є дуже важливою складовою в процесі прогнозування та прийняття рішень [1].

### Постановка задачі

Визначення компонентного складу промислових викидів в атмосферу — одне з головних завдань екології і технологічного моніторингу. І тут часто найвигідніше, а іноді і єдине прийнятний спосіб вирішення цього завдання полягає в застосуванні дистанційних методів, які працюють на основі вимірювання диференціального поглинання [2].

З кожним роком розширюються номенклатура та області застосування волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів і приладів на їх основі [3, с. 125]. Не стала винятком і область газовимірювальної техніки.

Питання методики розрахунку приладів та їх характеристик набуває першочергового значення.

### Методика розрахунку характеристик

#### Спосіб перший

Оптично-абсорбційний метод полягає в здатності газів поглинати інфрачервоні промені в суво-ро визначених для кожного газу ділянках спектру завдяки наявності коливально-обертальних смуг поглинання [4].

Величина ослабленого потоку випромінювання  $\Phi_i$ , що пройшов через вимірювальну кювету з газом, що аналізується, може бути визначена за законом Бугера—Ламберта—Бера.

Величина ослабленого потоку випромінювання  $\Phi_i$  є той параметр, який інформує про концентрацію газу  $C_x$ .

Можливий такий спосіб визначення концентрації газу. На рис. 1 наведена функціональна схема реалізації способу.

Газ прокачується через вимірювальну кювету (відкритий канал), яка знаходиться в одному з робочих

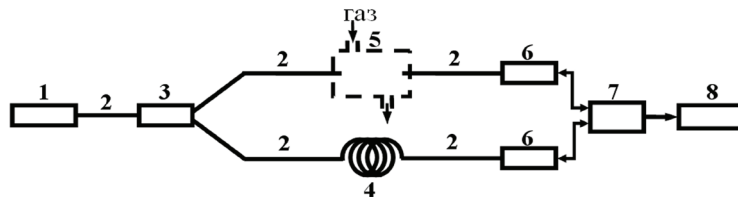


Рис. 1. Функціональна схема волоконно-оптичного перетворювача концентрації газу (оптично-абсорбційний метод)

плечей, друге плече є волоконно-оптичною лінією зв'язку, втратами енергії випромінювання в якій можна знехтувати.

Вимірюванням приймачами інфрачервоного випромінювання (БІЗПН, які перетворюють зміну інтенсивності випромінювання в частоту електричного сигналу [5]), з попередньо нанесеними на них інтерференційними фільтрами, довжина хвилі пропускання яких узгоджена з довжиною хвилі власного поглинання газу, та вимірюванням різниці інтенсивності потоків через два плеча, визначають зміну частоти вихідних сигналів. А за зміною частоти електричних сигналів визначають концентрацію газу.

Джерело 1 інфрачервоного випромінювання створює потік випромінювання  $\Phi_0$ , який надходить на світловод 2, оптичний розгалужувач 3, світловод 4, вимірювальну кювету 5 (відкритий канал), фотоприймачі 6, з яких частотні сигнали надходять на гетеродин 7 і блок обробки частоти 8. Величина ослабленого потоку випромінювання  $\Phi_1$ , що пройшов через вимірювальну кювету (відкритий канал) 5 може бути визначена за законом Бугера—Ламберта—Бера:

$$\Phi_1 = \Phi_0 e^{-\alpha_1 C_{x1} l_1}, \tag{1}$$

де  $\Phi_0$  — величина потоку інфрачервоного випромінювання на вході вимірювальної кювети (відкритий канал) 5;  $\Phi_1$  — величина потоку інфрачервоного випромінювання на виході вимірювальної кювети (відкритий канал) 5;  $\alpha_1$  — коефіцієнт поглинання газу, що аналізується і залежить від ступеня узгодження спектрів поглинання газу, спектральної характеристики джерела інфрачервоного випромінювання і спектральної чутливості приймача інфрачервоного випромінювання;  $C_{x1}$  — концентрація газу, що аналізується;  $l_1$  — довжина вимірювальної кювети (відкритий канал) 5.

Величина ослабленого потоку випромінювання  $\Phi_2$ , що пройшов через світловод 4 може бути також визначена за законом Бугера—Ламберта—Бера:

$$\Phi_2 = \Phi_0 e^{-\alpha_2 C_{x2} l_2}, \tag{2}$$

де  $\Phi_0$  — величина потоку інфрачервоного випромінювання на вході світловода 4;  $\Phi_2$  — величина потоку інфрачервоного випромінювання на виході світловода 4;  $\alpha_2$  — коефіцієнт поглинання світловода;  $l_2$  — довжина світловода 4.

Потоки випромінювання  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ , при попаданні інфрачервоного випромінювання відповідно на приймачі, створюють на їх виходах, пропорційно до ступеня ослаблення потоків, різницю частот  $\Delta f_1$  і  $\Delta f_2$ , яка, в свою чергу, пропорційна концентрації газу, що аналізується.

Приймаючи до уваги (1) і (2) і враховуючи, що коефіцієнт затухання, наприклад, для кварцових світловодів прямує до нуля ( $2 \cdot 10^{-4}$  дБ/м), отримаємо співвідношення:

$$\Delta f_1 = \frac{1}{\Delta \tau_{1n}} \sim \Phi_1; \quad \Delta f_2 = \frac{1}{\Delta \tau_{2n}} \sim \Phi_2, \tag{3}$$

де  $\tau$  — час накопичення заряду;  $\Phi$  — величина світлового потоку;  $n$  — об'єм  $n$  області БІЗПН.

Враховуючи, що втрати в світловоді порядку 0,14 дБ/км на частотах власного поглинання газу [6] рівняння (2) матиме вигляд (при  $1 < l_2 < 100$  м):

$$\Phi_2 = \Phi_0 \tag{4}$$

Використовуючи формули (1) і (4) отримаємо таке співвідношення:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{\Delta f_1}{\Delta f_2} = \frac{\Phi_0 e^{-\alpha_1 C_{x1} l_1}}{\Phi_0} \quad \text{або} \quad \frac{\Delta f_1}{\Delta f_2} = e^{-\alpha_1 C_{x1} l_1}, \quad \text{або} \quad \ln \frac{\Delta f_1}{\Delta f_2} = -\alpha_1 C_{x1} l_1.$$

Отримаємо

$$C_{x1} = \frac{1}{\alpha_1 l_1} \ln \frac{\Delta f_1}{\Delta f_2}. \tag{5}$$

Отже, концентрація газу, що аналізується, визначається формулою (5). Наявність БІЗПН-приладів та світловодів підвищує надійність, значно зменшує розміри приладу, спрощує встановлення концентрації газу і підвищує надійність запропонованого способу.

## Спосіб другий

Робота даного волоконно-оптичного сенсора (ВОС) концентрації газу ґрунтується на принципі диференціального оптичного поглинання, який був запропонований в [7]. Основне рівняння для розрахунку вимірюваної концентрації газу за методом диференціального поглинання має вигляд [7]

$$N = \frac{Pr(\lambda_2) - Pr(\lambda_1)}{[\sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_2)]lPr(\lambda_2)}, \quad (6)$$

де  $N$  — парціальний тиск (концентрація) газу в повітряній суміші ( $N = 760$  Торр відповідає концентрації  $C = 100\%$ );  $\lambda_1$  — довжина хвилі, що відповідає лінії поглинання газу (робоча довжина хвилі);  $\lambda_2$  — опорна довжина хвилі, що лежить за межами поглинання;  $l$  — довжина вимірювальної кювети (каналу) з газом;  $Pr(\lambda_i)$  (де  $i = 1, 2$ ) — оптична потужність на довжині хвилі  $\lambda_i$ ,  $\sigma(\lambda_i)$  — переріз поглинання газу на довжині хвилі  $\lambda_i$ .

Функціональна схема пристрою, який працює на основі методу диференціального вимірювання концентрації газу, показана на рис. 2.

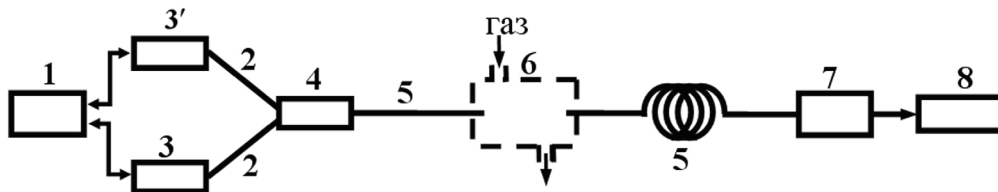


Рис. 2. Функціональна схема волоконно-оптичного перетворювача концентрації газу (диференціальний метод)

Генератор імпульсів 1 періодично вмикає світловипромінювальні діоди 3, 3' з довжинами хвиль відповідно  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , які поширюються по світловодах 2 розгалужувача 4. Після розгалужувача випромінювання через світловод 5 потрапляє в вимірювальну кювету (канал) 6, пройшовши через яку і поширюючись далі по світловоду 5, потрапляє на приймач оптичного випромінювання 7, в нашому випадку — БІЗПН-прилад, на виході якого ми отримуємо пачки імпульсів, які пропорційні інтенсивності світлового випромінювання (3). Далі з приймача електричні сигнали надходять до мікропроцесора 8, який їх обробляє і видає значення концентрації газу  $N$ .

Така схема дозволяє значно спростити сам метод, а пристрій не потребує модуляторів, оптичних фільтрів і використовує лише один канал та одну лінію оптичного зв'язку. Більш того, оскільки, опорна хвиля, її інтенсивність, не залежить від концентрації газу (наприклад, метану), то в даному випадку частота проходження імпульсів буде лише функцією концентрації газу.

Мінімальна виявлена концентрація газу (за відсутності флуктуацій сигналу) визначається рівнем шуму приймальної системи  $Pn$  і відповідає умові  $Pr(\lambda_2) - Pr(\lambda_1) = Pn$ . В цьому випадку вираз (6) може бути записаний у вигляді:

$$N_{\min} = \frac{Pn}{[\sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_2)]lPr(\lambda_2)}, \quad (7)$$

де потужність  $Pr(\lambda_2)$ , що надходить на фотоприймач, обчислюється з урахуванням втрат у всіх елементах ВОС (якщо загальна довжина світловодів менше 0,1 км, то можна вважати, що втрати енергії випромінювання рівні нулю).

$Pr(\lambda_2) = \text{const}$  і дорівнює потужності випромінювання, яке надходить до приймача 7, та у разі незмінної довжини вимірювального каналу  $l$ , виходячи з (7) маємо:

$$N_{\min} = \frac{Pn}{[\sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_2)]C}, \quad (8)$$

де  $C = lPr(\lambda_2) = \text{const}$ ;  $\sigma(\lambda_1)$  і  $\sigma(\lambda_2)$ , відповідно, пропорційні зміні частоти сигналу БІЗПН-

приймача ( $\sigma(\lambda_i) \sim f_i$ ).

### Висновки

Технічні характеристики оптичних волокон і напівпровідникових лазерів, що серійно випускаються, дозволяють реалізувати волоконно-оптичну систему для реєстрації певного газу в повітрі економічно сумірною з вартістю звичайних каналів оптичного зв'язку.

Подана методика розрахунку, що використовує принцип диференціального оптичного поглинання, і принцип оптично-абсорбційного методу в діапазоні різних довжин хвиль залежно від параметрів використаних компонентів, може бути використана для оцінки характеристик ВОС, призначених для вимірювання концентрації газів, наприклад, таких як метан, і інших вибухонебезпечних газів (наприклад,  $C_3H_8$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  і ін.), токсичних, агресивних і отруйних газів.

На основі відомих волоконно-оптичних систем та спеціально розроблених оптичних волокон та матеріалів, аналіз газового середовища є метрологічно точнішим, практичнішим, надійнішим, а в деяких випадках, таких, наприклад, як одночасне вимірювання кількості газів в багатьох точках на відстані (у кілька кілометрів), єдино можливим.

Очевидно, що газовимірювальні технології та методи газового аналізу стрімко розвиваються, а це свідчить про те, що контроль газових параметрів робочої зони, моніторинг екологічного стану середовища, продовжує залишатися актуальним питанням. Більш того, зростають функціональні вимоги до нових типів газових перетворювачів, що в свою чергу, приводить до пошуку нових та вдосконалення уже наявних методів та прийомів, які використовуються у газоаналітичному приладобудуванні.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Екоінформаційні, багатопараметрові газоаналітичні прилади і системи екологічного моніторингу довкілля [Електронний ресурс] / О. А. Дашковський, І. Л. Міхеєва, В. П. Приміський // Новини ЗАТ «Украналіт» — Режим доступу до статті: [http://www.ukranalyt.com.ua/index4\\_1.htm](http://www.ukranalyt.com.ua/index4_1.htm).
2. Колбычев Г. В. Определение концентраций газов в промышленных выбросах по ореолу лазерного луча / Г. В. Колбычев // Изв. ВУЗов. Физика. — 2003. — Т.46, № 10. — С. 33—39.
3. Мікроелектронні сенсори фізичних величин: Науково-навчальне видання. В 3 томах. Том 3. Книга 2 / [В. Вуйцік, З. Ю. Готра, О. З. Готра, В. В. Черпак та ін.]; за ред. З. Ю. Готри. — Львів : Ліга-Прес, 2007. — 367 с.
4. Алексеев В. А. Опыт создания переносных многокомпонентных газоанализаторов с использованием оптического абсорбционного метода / В. А. Алексеев, В. А. Яценко // Радиотехника. — 2006. — Вып 146. — С. 192—197.
5. Кнаб О. Д. БИСПИН — новый тип полупроводниковых приборов / О. Д. Кнаб // Электронная промышленность. — 1989. — Вып. 8. — С. 3—8.
6. Мидвентер Д. Э. Волоконные световоды для передачи информации / Д. Э. Мидвентер. — М. : Радио и связь, 1983. — 336 с.
7. Chan K. Remote sensing system for near-infrared differential absorption of CH<sub>4</sub> gas using low-loss optical fibre link / K. Chan, H. Ito, H. Inaba // Appl. Opt. — 1984. — V. 23, № 19. — P. 3415—3420.

Рекомендована кафедрою екології та економічної кібернетики

Надійшла до редакції 18.12.09  
Рекомендована до друку 25.01.10

**Яремчук Володимир Федорович** — доцент, **Кравчук Наталія Сергіївна** — доцент, **Смішний Сергій Миколайович** — аспірант.

Кафедра фізики, Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського