

УДК 621.375; 543.272

Яремчук В.Ф., Кравчук Н.С., Смішний С.М. (Україна, Вінниця)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО

ПЕРЕТВОРЮВАЧА ГАЗУ

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.

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

Визначення компонентного складу промислових викидів в атмосферу – одне з головних завдань екології і технологічного моніторингу. І тут часто найбільш вигідне, а іноді і єдине прийнятне вирішення даного 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 суворо визначених для кожного газу ділянках спектру завдяки наявності коливально-обертальних смуг поглинання [4].

Величина ослабленого потоку випромінювання Φ_i , що пройшов через вимірювальну кювету з газом, що аналізується, може бути визначена за законом Бугера-Ламберта-Бера.

Величина ослабленого потоку випромінювання Φ_i і є той параметр, який інформує про концентрацію газу C_x .

Можливий наступний спосіб визначення концентрації газу. На кресленні наведена функціональна схема реалізації способу (рис.1.).

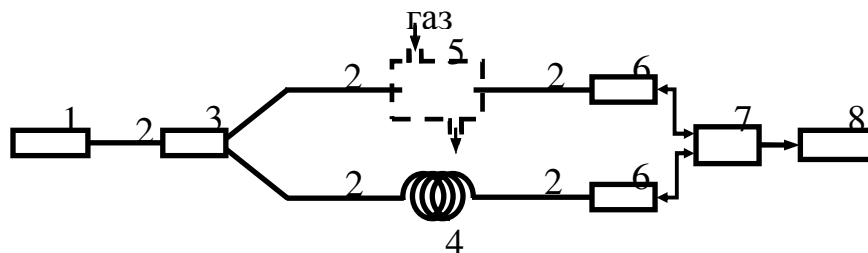


Рисунок 1 – Функціональна схема волоконно-оптичного перетворювача газу (оптично-абсорбційний метод).

Газ прокачується через вимірювальну кювету (відкритий канал), яка знаходиться в одному з робочих плечей, друге плече являє собою волоконно-оптичну лінію зв'язку, втратами енергії випромінювання в якій можна знехтувати.

Шляхом вимірювання приймачами інфрачервоного випромінювання (БІЗПНи, 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 вимірювання 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 Φ_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 Φ_1 , що пройшов через вимірювальну кювету (відкритий канал) 5 може бути визначена за законом Бугера-Ламберта-Бера:

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

де Φ_0 - величина потоку інфрачервоного випромінювання на вході вимірювальної кювети (відкритий канал) 5; Φ_1 - величина потоку інфрачервоного випромінювання на виході вимірювальної кювети (відкритий канал) 5; α_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 Φ_2 , що пройшов через світловод 4 може бути також визначена за законом Бугера-Ламберта-Бера:

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

де Φ_0 - величина потоку інфрачервоного випромінювання на вході світловода 4; Φ_2 - величина потоку інфрачервоного випромінювання на виході світловода 4; α_2 - коефіцієнт поглинання світловода; l_2 - довжина світловода 4.

Потоки випромінювання Φ_1 і Φ_2 , при попаданні інфрачервоного випромінювання відповідно на приймачі, створюють на їх виходах, пропорційно до ступеня ослаблення потоків, різницю частот Δf_1 і Δf_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:

$$\Delta f_1 = \frac{1}{\Delta \tau_1 n} \approx \Phi_1, \quad \Delta f_2 = \frac{1}{\Delta \tau_2 n} \approx \Phi_2, \quad (3)$$

де τ - час накопичення заряду; Φ - величина світлового потоку; n - об'єм n області БІЗПНА.

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): $\Phi_2 = \Phi_0$ (4).

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

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

Отримаємо:

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

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 наступний вигляд [7]:

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

де N - парціальний тиск (концентрація) газу в повітряній суміші ($N=760$ Торр відповідає концентрації $C=100\%$); λ_1 - довжина хвилі, що відповідає лінії поглинання газу (робоча довжина

хвилі); λ_2 – опорна довжина хвилі, що лежить за межами поглинання; l – довжина вимірювальної кювети (каналу) з газом; $\text{Pr}(\lambda_i)$ (де $i = 1, 2$) – оптична потужність на довжині хвилі λ_i , $\sigma(\lambda_i)$ – переріз поглинання газу на довжині хвилі λ_i .

Наприклад, для метану $\Delta\sigma = \sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_2) = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/Торр}$ для робочої довжини хвилі $\lambda_1 = 1,667 \text{ мкм}$ і $\Delta\sigma = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/Торр}$ для $\lambda_1 = 1,332 \text{ мкм}$ [8].

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

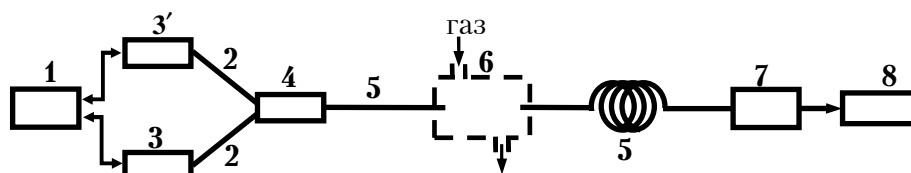


Рисунок 2 – Функціональна схема волоконно-оптичного перетворювача газу (диференціальний метод).

Генератор імпульсів 1 періодично вмикає світловипромінюючі діоди 3, 3' з довжинами хвиль відповідно λ_1 і λ_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 – БЗПН-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 слідування імпульсів буде лише функцією концентрації газу.

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

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

де потужність $\text{Pr}(\lambda_2)$, що надходить на фотоприймач, розраховується з урахуванням втрат у всіх елементах ВОС (при загальній довжині світловодів менше 0,1 км, можна вважати, що втрати енергії випромінювання рівні нулю).

$\text{Pr}(\lambda_2) = \text{const}$ і рівна потужності випромінювання, яке надходить до приймача 7 та при незмінній довжині вимірювального каналу l , виходячи з (7) маємо: $N_{\min} = \frac{Pn}{[\sigma(\lambda_1) - \sigma(\lambda_2)]C}$ (8), де $C = l \text{Pr}(\lambda_2) = \text{const}$; $\sigma(\lambda_1)$ і $\sigma(\lambda_2)$ відповідно пропорційні зміні частоти сигналу БЗПН-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.

Представлена 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 існуючих волоконно-оптичних систем та спеціально розроблених оптичних волокон та матеріалів, аналіз газового середовища є більш метрологічно точним, практичним, надійнішим, а в деяких випадках, таких наприклад, як одночасне вимірювання в багатьох точках на відстані (у кілька км) кількох газів, 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 призводить до пошуку нових та вдосконалення уже існуючих 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.
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. Григор'єв, В. Каліта, О.М. Мельник, Є. Потенцік, В.В. Черпак]; За редакцією 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 / Мидвентер Д.Э. –М.: Радио и связь, 1983. -336 с.
7. Chan K. Remote sensing system for near-infrared differential absorption of CH₄ gas using low-loss optical fibre link / K. Chan, H. Ito, H. Inaba // Appl. Opt. -1984. -v.23, №19. -P.3415-3420.
8. Миронов С.А. Волоконно-оптический датчик концентрации метана: расчет основных характеристик / С.А. Миронов // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. -2007. -Вестник 44. -С. 72-78.