
ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

УДК 681.7.068:681.7:543.27.08

С.М. СМІШНИЙ¹, В.Ф. ЯРЕМЧУК¹, Н.С. КРАВЧУК¹, С.Є. ТУЖАНСЬКИЙ²

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ВИХІДНИЙ СИГНАЛ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

¹*Вінницький державний педагогічний університет імені М. Коцюбинського, 21001, вул. Острозького, 32, Вінниця, Україна, E-mail: ssmishnuv@mail.ru*

²*Вінницький національний технічний університет, 21021, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна*

Анотація. Проведено аналіз факторів впливу на вихідний сигнал засобів вимірювального контролю концентрації газу на основі волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів.

Аннотация. Проведен анализ факторов влияния на исходный сигнал средств измерительного контроля концентрации газа на основе волоконно-оптических первичных измерительных преобразователей.

Annotation. The analysis of the factors of influence on the output signal of measuring control facilities of gas concentration on the basis of fiber optic primary measuring transformers is presented.

Ключові слова: перетворювач, концентрація, газ, фактори впливу, волоконно-оптичний.

ВСТУП

Сьогодні надзвичайно стрімко відбувається розвиток засобів контролю концентрації газу на основі волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів [1, 2]. Для достовірної оцінки екологічного стану довкілля, при розробці оптичних засобів контролю концентрації газу потрібно враховувати всі існуючі чинники спотворення вихідного сигналу відповідного засобу. Ґрунтовний аналіз та мінімізація впливу цих факторів сприяє оптимізації метрологічних характеристик оптичного засобу контролю та дозволяє збільшити точність та достовірність отриманої датчиком інформації.

Потрібно дослідити дане питання в області застосування засобів вимірювального контролю концентрації газу на основі волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів, що дають змогу як локального так і дистанційного вимірювання.

Дана проблематика висвітлена у роботі [3], де розглянуто процес трансформації лазерного випромінювання в атмосфері та вплив на нього різних факторів при використанні імпульсної лідарної системи. У роботі [4] розглянуто основні фактори, які впливають на процес перенесення випромінювання у оптичному сферичному перетворювачі (інтегровальній сфері). В роботах [5, 6] визначені оптимальні умови роботи систем атмосферного зв'язку, виконано опис та моделювання впливу атмосфери на передачу інформації, відповідно.

Тому актуальним питанням є проведення комплексного аналізу впливу на вихідну енергетичну складову у заданому спектральному діапазоні засобу контролю, що включає оптичний вимірювальний канал та волоконно-оптичні вузли.

ПРОВЕДЕННЯ АНАЛІЗУ

Перш за все, при побудові засобів вимірювального контролю концентрації газу на основі волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів потрібно визначити та врахувати енергетичний потенціал та умови функціонування волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів, призначених для визначення складу та концентрації газу на заданій довжині хвилі, тобто визначити взаємозв'язок між довжиною волоконно-оптичного тракту, використаного у системі, мінімальною визначеною або заданою концентрацією обраного газу та чутливістю приймача оптичного випромінювання, енергетичними втратами системи, а також потужністю випромінювання джерела.

З огляду на особливості пропускання кварцових оптичних волокон (рис.1), які найчастіше використовуються при побудові волоконно-оптичних систем передачі із спектральними вікнами прозорості у діапазонах довжин хвиль 1310нм та 1550нм відповідно, використання кварцових волокон органічно поєднується з вимірюванням концентрації багатьох газів, довжини хвиль поглинання яких одночасно знаходяться у вікні прозорості атмосфери та вікні прозорості кварцових волокон [7].

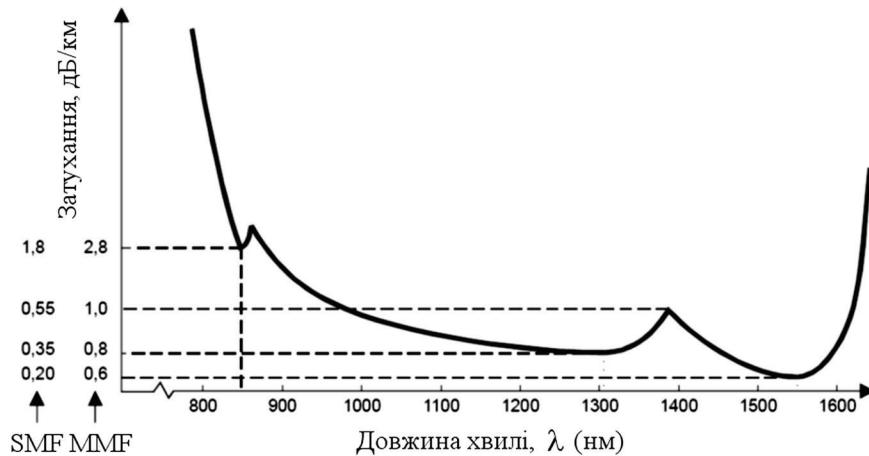


Рис.1. Власні втрати в оптичному волокні [8]: SMF (single mode fiber) – одномодовое волокно; MMF (multi mode fiber) – багатомодовое волокно

Розглянемо вплив на вихідну енергетичну складову волоконно-оптичного первинного вимірювального перетворювача концентрації газу, що використовує довжину хвилі поглинання газу, яка лежить у вікні прозорості атмосфери 1,13...1,38 мкм [9].

Спрощена функціональна схема системи контролю і вимірювання концентрації газу з використанням волоконно-оптичних ліній, приведена на рис.2.

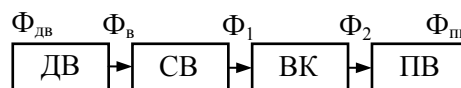


Рис. 2. Функціональна схема системи контролю і вимірювання концентрації газу (оптично-абсорбційний метод)

Джерело випромінювання (ДВ) формує вхідний потік $\Phi_{дв}$ оптичного випромінювання, яке введене у світловод (СВ), потік Φ_1 надходить у вимірювальну комірку (ВК); Φ_2 – світловий потік, що виходить з вимірювальної комірки; $\Phi_{пв}$ – світловий потік, що надходить на приймач випромінювання (ПВ). Величина ослабленого потоку випромінювання, що пройшов через вимірювальну кювету з газом, може бути визначена за законом Бугера-Ламберта-Бера [10]:

$$\Phi_2 = \Phi_1 e^{-\alpha_{газ}Cl}, \quad (1)$$

де Φ_1 – величина потоку випромінювання до проходження досліджуваного середовища комірки; Φ_2 – величина потоку інфрачервоного випромінювання, що пройшов середовище вимірювальної кювети; C – концентрація газу у вимірювальному оптичному каналі; l – довжина поглинаючого шару; $\alpha_{газ}$ – коефіцієнт поглинання, що характеризує газ, який залежить від ступеня узгодження спектрів поглинання газу, спектральної характеристики джерела інфрачервоного випромінювання і спектральної чутливості

приймача інфрачервоного випромінювання.

З точки зору потоку випромінювання Φ_6 вихідний інформативний сигнал визначається як

$$\Phi_{н6} = \Phi_6 \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 \tau_5; \quad \Phi_{н6} = \Phi_6 \tau_1 \tau_2 \tau_3 \left(e^{-\alpha_{газ} Cl} \right) \tau_5, \quad (2)$$

де τ_1 – коефіцієнт пропускання з'єднань у лінії; τ_2 – коефіцієнт пропускання оптичного волокна; τ_3 – коефіцієнт пропускання елемента вихідного випромінювання у кюветі; τ_4 – коефіцієнт пропускання вимірювального каналу; τ_5 – коефіцієнт пропускання оптичної системи фотоприймача робочого каналу.

Власне $\alpha_{газ} = \alpha_{газ}(v, T, P) \cdot \tau_m(\lambda)$, де $\alpha_{газ}(v, T, P)$ – спектральний коефіцієнт поглинання газу, що аналізується; $\tau_m(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання атмосферних газів (а саме H_2O та CO_2).

Розглянемо вплив відносної вологості та вуглекислого газу на проходження інфрачервоного випромінювання в середовищі у даному атмосферному вікні прозорості, тобто на $\alpha_{газ}$. Залежність для коефіцієнта поглинання даних газів [6] має вигляд

$$\tau_m(\lambda) = \tau_{H_2O}(\lambda) \cdot \tau_{CO_2}(\lambda), \quad (3)$$

де $\tau_{H_2O}(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання H_2O на довжині хвилі λ ; $\tau_{CO_2}(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання CO_2 на довжині хвилі λ . Для розрахунку поглинання випромінювання водяною парою вводять поняття кількості осадженої води ω , що вимірюється товщиною шару води (мм), яку можна отримати при заданому перерізі шару, коли вся пара, що міститься в атмосфері, перетвориться у воду [11]

$$\omega = \omega_0 L_a, \quad (4)$$

де L_a – товщина поглинаючого шару атмосфери; ω_0 – кількість осадженої води (мм) на довжині 1 км. Знайдемо кількість осадженої води ω при: температурі $35^\circ C$ та відносній вологості 100%. Кількість осадженої води на довжині 1 км (ω_0) становитиме

$$\omega_0 = \frac{216,7}{T_n} \cdot \frac{\varphi}{100} e \cdot 10^4 = \frac{216,7}{273 + 35} \cdot \frac{100}{100} 5,624 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 = 39,5688571 \approx 39,57 \text{ (мм/км)},$$

де T_n – температура повітря, $^\circ K$; φ – відносна вологість, %; e – пружність насичуючих парів при T_n , Па. Використовуючи формулу (4) знаходимо кількість осадженої води ω на довжині $L_{a1} = 1 \text{ м} = 0,001 \text{ км}$ та $L_{a0,5} = 0,5 \text{ м} = 0,0005 \text{ км}$

$$\omega_1 = 39,57 \cdot 0,001 = 0,03957 \text{ (мм)}; \quad \omega_{0,5} = 39,57 \cdot 0,0005 = 0,019785 \text{ (мм)}.$$

Кількість осадженої води на довжині 1 км (ω_0) зменшується для температури повітря $T_n < 35^\circ C$ та відносній вологості 100 %. Спектральний коефіцієнт пропускання водяної пари для горизонтальної траси вікна 1,13...1,38 мкм та $\omega = 0,02 \text{ мм}$ складає $\tau_{ai} = 0,982$, для $\omega = 0,05 \text{ мм}$ складає $\tau_{ai} = 0,971$ (де τ_{ai} – табульовані значення) [9]. Відсотковий вміст вуглекислого газу в атмосфері постійний і складає близько 0,032%, тому спектральний коефіцієнт пропускання випромінювання для товщини $L_a = 500 \text{ м}$ поглинаючого шару атмосфери горизонтальної траси в спектральній області 1,3 мкм рівний 1 [11]. Тому, для обраної спектральної лінії поглинання газу у даному вікні прозорості та при використанні напівпровідникових джерел випромінювання і заданих параметрів, коефіцієнт поглинання даних газів прямує до нуля і впливом H_2O та CO_2 на результати вимірювання концентрації газу у атмосфері нехтують [7].

Тиск P і температура T досліджуваного середовища впливають на процес поширення випромінювання за рахунок того, що при їх зміні змінюється і спектральний коефіцієнт поглинання $\alpha_{газ}(v, T, P)$. Змінюється форма контуру поглинаючих спектральних ліній, в основному, завдяки зіткненням молекул [12]

$$\alpha_{газ}(v, T, P) = \frac{s}{\pi} \cdot \frac{\gamma_L}{(v - v_0)^2 + \gamma_L^2}, \quad (5)$$

де γ_L - лоренцівська напівширина спектральної лінії; s - інтенсивність лінії; ν_0 - центр лінії поглинання. Де γ_L (для двокомпонентної суміші) [4]

$$\gamma_L = \gamma_L^0 \frac{P}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \quad (6)$$

де γ_L^0 - напівширина лінії за нормальних умов ($P_0=1$ атм, $T_0 = 273$ °К).

Важливо пам'ятати, що інтенсивність випромінювання світлодіодів є функцією температури. Зміна інтенсивності рівна

$$I = I_0 \exp(-\alpha\theta), \quad (7)$$

де α - температурний коефіцієнт інтенсивності, а θ – температура в градусах Цельсія. Крім того, положення спектрального максимуму $\lambda_p(\theta)$ зміщується з температурою відповідно до виразу

$$\lambda_p(\theta) = \lambda_p(0) + \beta\theta, \quad (8)$$

де $\lambda_p(0)$ – положення спектрального максимуму при 0°С. У GaAsP-світлодіодів, наприклад, $\alpha = 10^{-3}$ °К⁻¹ і $\beta = 0,193$ нм/°К. Для 850 нм і 1300 нм лазерів $\lambda_p(\theta)$ зростає на 0,3 нм/°С і 0,1 нм/°С. Зміщення довжини хвилі випромінювання в лазерному діоді, може бути викликане не тільки зміною температури, але й змінами струму, які призводять до змін як характеристик світлопровода пристрою, так і внутрішньої температури. Також існує залежність вихідної потужності випромінювання лазерного діода від струму – вихідна оптична потужність зростає із збільшенням струмів

Мінімальна потужність, прийнята приймачем оптичного випромінювання, або, що теж саме, поріг чутливості фотоприймача, залежить від рівня шумів. Тому потрібно вжити заходів щодо стабілізації шумів у вимірювальній системі, що включає і приймач випромінювання.

Оскільки коефіцієнт затухання волокна $\alpha_{OB} = (-10/L_{OB}) \lg(P/P_0)$ [дБ/км], а P/P_0 - коефіцієнт пропускання оптичного волокна (ОВ), то вплив температури на ОВ можна обчислити, використовуючи приріст затухання для одномодових ОВ, що складає $\alpha_{OB1(\Delta T; \Delta \varphi)} = +0,05$ дБ/км (знак „+” вказує на приріст) в діапазоні температур -60...+85°С; при вологості 98%; для градієнтних багатомодових ОВ, на довжинах хвиль 850 і 1300нм, $\alpha_{OB2(\Delta T; \Delta \varphi)} \leq 0,2$ дБ/км [13]. Тоді τ_2 визначається формулою

$$\tau_2 = 10^{\frac{-((\alpha_{OB} \cdot L_{OB}) + (\alpha_{OB1,2(\Delta T; \Delta \varphi)} \cdot L_{OB}))}{10}}, \quad (9)$$

де $(\alpha_{OB1,2(\Delta T; \Delta \varphi)} \cdot L_{OB})$ – приріст затухання для ОВ з довжиною L_{OB} під дією температури. До затухання енергетичного потоку призводять деформації волокна, які теж потрібно враховувати. На рис. 3 приведені експериментальні залежності коефіцієнта кілометричного затухання різних типів волокон залежно від радіуса вигину, поздовжнього розтягування, поперечного стиснення і закручування. З представлених даних видно, що механічні навантаження приводять до істотного зростання коефіцієнта затухання полімерних і багатокомпонентних волокон. Кварцові волокна стійкіші до механічних дій, особливо поздовжнього характеру [14].

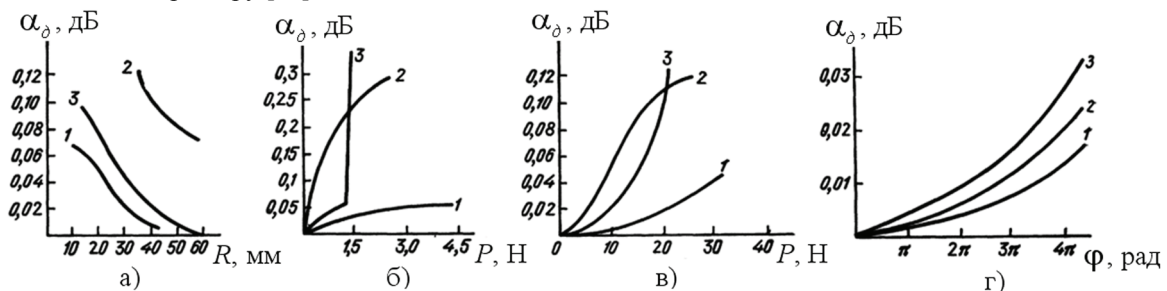


Рис. 3. Залежність додаткових втрат від:
 а – радіуса вигину; б – поздовжньої напруги; в – поперечного стиснення; г – кута осьового закручування; 1 – кварцове волокно; 2 – багатокомпонентне волокно; 3 – полімерне волокно

У волоконно-оптичному первинному вимірювальному перетворювачі або засобі, до якого входять елементи волоконної оптики, втрати на деформаціях, за умов сталості конструкції (після інсталяції), залишаються сталими і враховуються автоматично.

Волокно закріплюється в оптичному роз'ємі за допомогою епоксидної смоли. Цей процес важливий з погляду забезпечення надійності оптичного роз'єму. Епоксидна смола мінімізує температурні переміщення волокна, дозволяючи здійснювати поліровку торця без пошкодження волокна, крім того, вона забезпечує захист волокна від впливу навколишнього середовища.

Формула (2) змінюється відповідно, якщо система включає ще одне чи два ОВ заданої довжини, або ж додаткові оптичні елементи, які вносять коефіцієнти розподілу щодо енергетичного потоку (наприклад волоконно-оптичного розгалужувача, рис.4) .

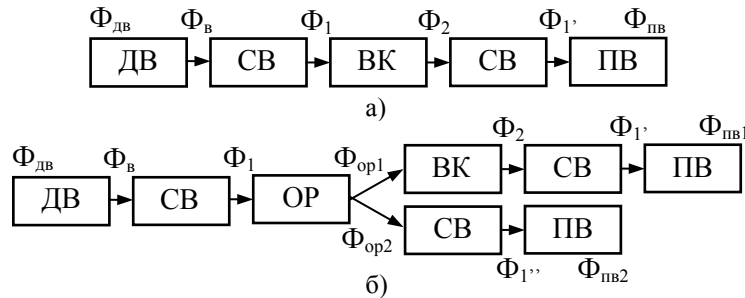


Рис. 4. Функціональні схеми систем контролю і вимірювання концентрації газу (оптично-абсорбційний метод)

Розглянемо рис.4,а: джерело випромінювання (ДВ) формує вхідний потік Φ_e оптичного випромінювання, яке введене у світловод (СВ); потік Φ_1 надходить у вимірювальну комірку (ВК); Φ_2 – світловий потік, що виходить з вимірювальної комірки, потік Φ_1 , оптичного випромінювання, яке було введене у вихідний світловод вимірювальної комірки та пройшовши СВ виходить з нього; Φ_{ne} – світловий потік, що надходить на приймач випромінювання (ПВ). Розглянемо рис.4,б: ДВ формує вхідний потік Φ_e оптичного випромінювання, яке введене у СВ; потік Φ_1 надходить у волоконно-оптичний розгалужувач (ОР); потік Φ_{op1} надходить у вимірювальну комірку (ВК); Φ_2 – світловий потік, що виходить з вимірювальної комірки; потік Φ_1 , оптичного випромінювання, яке було введене у вихідний світловод вимірювальної комірки та пройшовши СВ виходить з нього; Φ_{ne1} – світловий потік, що надходить на ПВ даного плеча; потік Φ_{op2} надходить у СВ, що слугує плечем (порівнюючий канал); потік Φ_1 , оптичного випромінювання, що виходить з світловоду; Φ_{ne2} – світловий потік, що надходить на ПВ даного плеча.

Тоді формула (2) буде мати вигляд (рис.4,а):

$$\Phi_{ne} = \Phi_e \tau_1 \tau_2 \tau_3 \left(e^{-\alpha_{gas} Cl} \right) \tau_3' \tau_2' \tau_5, \quad (10)$$

де τ_1 – коефіцієнт пропускання з'єднань у лінії; τ_2 – коефіцієнт пропускання оптичного волокна до комірки; τ_3 – коефіцієнт пропускання елемента вихідного випромінювання у кюветі; τ_4 – коефіцієнт пропускання вимірювального каналу; τ_3' – коефіцієнт пропускання елемента, що забезпечує введення випромінювання у вихідне волокно комірки; τ_2' – коефіцієнт пропускання оптичного волокна після комірки; τ_5 – коефіцієнт пропускання оптичної системи фотоприймача робочого каналу. Для схеми рис.4,б:

$$\Phi_{ne1} = \Phi_e \tau_1 \tau_2 \tau_6 \tau_3 \left(e^{-\alpha_{gas} Cl} \right) \tau_3' \tau_2' \tau_5; \quad (11)$$

$$\Phi_{ne2} = \Phi_e \tau_1'' \tau_2 \tau_6'' \tau_2'' \tau_5, \quad (12)$$

де τ_1' , τ_1'' – коефіцієнт пропускання з'єднань у лінії, відповідно; τ_2 – коефіцієнт пропускання оптичного

волокна; $\tau_{6'}$, $\tau_{6''}$ – коефіцієнт пропускання волоконно-оптичного розгалужувача (включає коефіцієнт розподілу енергетичного потоку та власні світлові втрати), відповідно; τ_3 – коефіцієнт пропускання елемента вихідного випромінювання у кюветі; τ_4 – коефіцієнт пропускання вимірювального каналу; τ_3 – коефіцієнт пропускання елемента, що забезпечує введення випромінювання у вихідне волокно комірки; τ_2 – коефіцієнт пропускання оптичного волокна після комірки; τ_2'' – коефіцієнт пропускання оптичного волокна порівнювального каналу; τ_5 – коефіцієнт пропускання оптичної системи фотоприймача відповідного каналу.

Температурний коефіцієнт зміни затухання волоконно-оптичного розгалужувача (1х2; 50/50%) становить $\alpha_T \leq 0,005$ дБ/°С [15]. Отже,

$$\tau_{6',6''} = k_{6',6''} \cdot 10^{\frac{-(\alpha_{op} + (\alpha_T \cdot \Delta T))}{10}}, \quad (13)$$

де $k_{6',6''}$ – коефіцієнти розподілу енергетичного потоку, відповідно (наприклад для розподілу 50/50% - $k_{6',6''} = 1/2$); α_{op} – власні втрати розгалужувача; $(\alpha_T \cdot \Delta T)$ – приріст затухання ОР зумовлений зміною температури.

Нелінійні ефекти у оптичному волокні також впливатимуть на енергетичну складову сигналу. А саме: вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР) (Раманівське) і розсіювання Манделъштама–Бріллоена (ВРМБ), результатом якого будуть оптичні втрати в ОВ. При дистанційному використанні засобів вимірювального контролю концентрації газу на основі волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів або використовуючи потужні джерела випромінювання енергетичного потоку задля підвищення точності вимірювання концентрації газу, слід враховувати порогові значення виникнення вищезгаданих нелінійних ефектів [7].

Співвідношення для визначення величини порогової потужності, при якій у волокні виникає ВКР:

$$P_{ВКР} \approx 10^{12} \cdot A_S \cdot \alpha, \quad (14)$$

де A_S – площа поперечного перетину ОВ в см², α – коефіцієнт втрат в см⁻¹. Розрахунок, проведений за цією формулою, для одномодового волокна затуханням $\alpha = 0,2$ дБ/км і діаметром серцевини $d_1 = 10$ мкм, дає значення порогової потужності виникнення ВКР $P_{ВКР} = 1,40$ Вт (для волокна $L = 5$ км). При збільшенні довжини ОВ цей поріг швидко знижується. Так, для довжини $L = 20$ км порогове значення $P_{ВКР}$ зменшується до 0,6 Вт (для того ж волокна з $\alpha = 0,2$ дБ/км) [16].

Для визначення порогового значення потужності, при якому виникає ВРМБ:

$$P_{ВРМБ} \cong 10^9 \cdot A_S \cdot \alpha, \quad (15)$$

При тих же значеннях A_S і α , що і для ВКР і волокна довжиною 5 км величина порогової потужності безперервного випромінювання складає $1,44 \cdot 10^{-3}$ Вт = 1,44 мВт. У випадку коротких оптичних імпульсів цей поріг підвищується до ~10 мВт [16].

Отже, використовуючи потужності випромінювання, для певної конструкції менші порогових потужностей виникнення нелінійних ефектів, впливом даних нелінійних ефектів нехтують.

На рис. 5. представлена схема взаємопов'язаних чинників впливу на вихідний сигнал засобу вимірювального контролю концентрації газу на основі волоконно-оптичного первинного вимірювального перетворювача на основі співвідношення (2).

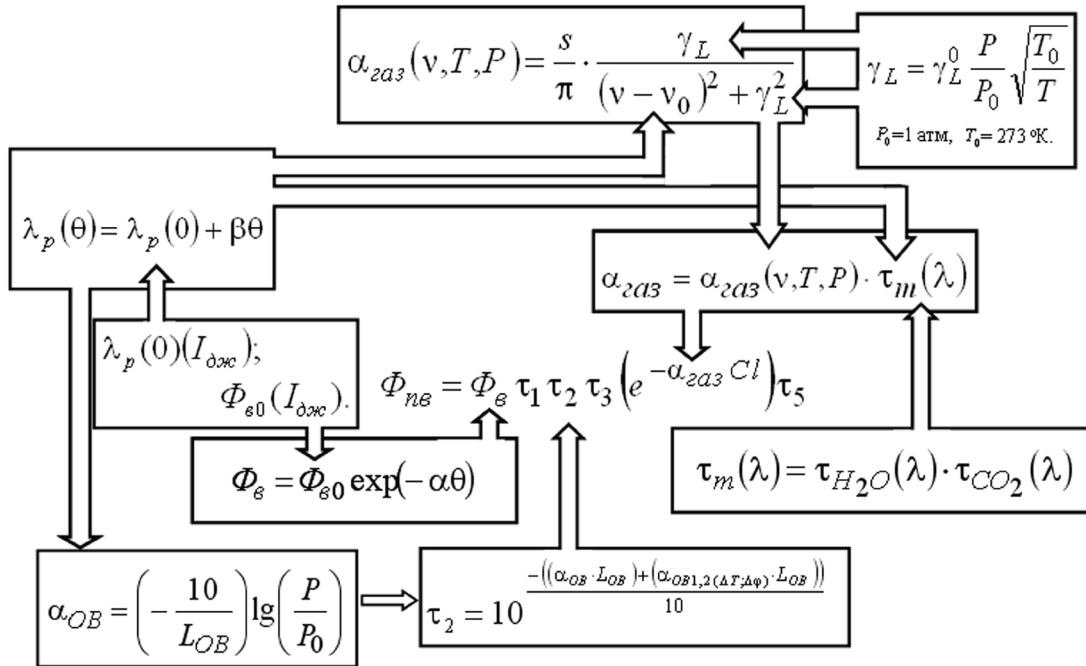


Рис. 5. Схема взаємопов'язаних чинників впливу на вихідний сигнал засобу вимірювального контролю концентрації газу на основі волоконно-оптичного первинного вимірювального перетворювача

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз факторів впливу на вихідний сигнал засобів вимірювального контролю концентрації газу на основі волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів. Розглянуто вплив тиску і температури на коефіцієнт поглинання газу інфрачервоного випромінювання, зокрема лоренцівський ефект зміни контуру спектральних ліній поглинання молекул газу.

Проведено аналіз впливу відносної вологості та вуглекислого газу на проходження інфрачервоного випромінювання в газовому середовищі, що дозволило визначити та проаналізувати отримані розрахункові дані про спектральний коефіцієнт поглинання H₂O і CO₂ атмосферного вікна прозорості 1,15...1,35 мкм, який показав, що в даному вікні прозорості та при використанні напівпровідникових джерел випромінювання і заданих параметрів, впливом H₂O і CO₂ на результати вимірювання концентрації газу у атмосфері нехтують. Дане атмосферне вікно прозорості органічно поєднується з оптично – енергетичними властивостями кварцових волоконно-оптичних ліній та елементів, що зумовлює перспективу їх використання для побудови волоконно-оптичних первинних вимірювальних перетворювачів та, на їх основі, засобів контролю концентрації певного газу, довжина хвилі поглинання якого одночасно знаходиться у вікні прозорості атмосфери та вікні прозорості кварцових волоконно-оптичних ліній та елементів.

Можливий вплив нестабільності джерела випромінювання на точність вимірювання концентрації газу зумовлює застосування відповідних заходів щодо стабілізації параметрів джерела випромінювання, а також заходів щодо стабілізації шумів у вимірювальній системі, що включає і приймач випромінювання. Розглянуто вплив факторів навколишнього середовища та нелінійних ефектів на вихідний сигнал волоконно-оптичного первинного вимірювального перетворювача концентрації газу. Аналіз умов виникнення нелінійних ефектів показує, що, використовуючи потужності випромінювання, для певної конструкції, менші порогових потужностей виникнення нелінійних ефектів, їх впливом нехтують.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fiber-optic evanescent-field laser sensor for in-situ gas diagnostics/ Ulrike Willer, Dirk Scheel, Irina Kostjucenko, Christian Bohling, Wolfgang Schade, Eckhard Faber// Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, Volume 58, Issue 11, September 2002, Pages 2427-2432.
2. Fibre optic techniques for remote spectroscopic methane detection—from concept to system realisation/ B. Culshaw, G. Stewart, F. Dong, C. Tandy, D. Moodie//Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 51, Issues 1-3, 31 August 1998. – Pages 25-37.
3. Васильківський І.В. Аналіз рівняння лазерного зондування атмосфери за допомогою лідача /І.В.

- Васильківський, В.Г. Петрук, С.М. Кватернюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2009, № 6.- С.27-32.
4. Іщенко В.А. Математична модель оптичного сферичного перетворювача інтерактивної системи контролю мікроконцентрації забруднювальних газів/В.А. Іщенко, В.Г. Петрук// Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2006, № 6. – С.85-89.
 5. Дослідження розповсюдження лазерного випромінювання в атмосферному середовищі / В. Петрук, С. Кватернюк, І. Васильківський, А. Іванов, П. Турчин //Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, №2 (16), 2008.- С.114-125.
 6. Адаптивний відкритий оптичний канал зв'язку/ В.П. Кожем'яко, Г.Л. Лисенко, С.Є. Тужанський, В.І. Маліновський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, №1(9), 2005.- С.242-251.
 7. Яремчук В.Ф. Аналіз факторів впливу на вихідну енергетичну складову перетворювача концентрації газу на основі волоконно-оптичних систем /В.Ф. Яремчук, С.М. Смішний, Н.С. Кравчук// III-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology–2011), 21-24 вересня, 2011. Збірник наукових статей. Том 2. – Вінниця: ВНТУ, 2011. –С. 359-362.
 8. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Убайдуллаев Р.Р. –М.: Эко-трендз, 2001.- 268с.
 9. Круз П. Основы инфракрасной техники/Круз П., Макглоумен Л., Макквистан Р.; перев. с англ. В. Н. Чернышева и А. Г. Шереметьева. –М., Воениздат, 1964.– 464с.
 10. Фарзани Н.Г. Автоматические детекторы газов / Н.Г. Фарзани, Л.В. Илясов. –М.: „Энергия”, 1972. –168 с. - (Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества).
 11. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Леонид Зиновьевич Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978.– 400с.
 12. Іщенко В. А. Високочутливі засоби контролю малих концентрацій газів : [Монографія] / В. А. Іщенко, В. Г. Петрук. – Вінниця : ВНТУ, 2010. –152 с.
 13. Портнов Э.Л. Оптические кабели связи / Портнов Э.Л.– М.: ЦНТИ «Информсвязь», 2000.– 112с.
 14. Гроднев И. И. Волоконно-оптические линии связи: [Учеб. пособие для вузов]/Гроднев И. И. – [2-е изд., перераб. и доп.]. -М.: Радио и связь, 1990. — 224 с.: ил., ст., 201-202
 15. НВП „ОПТИЛАЙН”. Телекоммуникационное оборудование для оптоволоконных систем передачи данных.– [Електронний ресурс]; грудень 2010.– Режим доступу: http://www.optiline.kiev.ua/couple_1.htm.
 16. Скларов О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы / Олег Константинович Скларов.– М.: СОЛОН-Р, 2001.– 237с.

Надійшла до редакції 21.11.2011р.

СМІШНИЙ С.М. – асистент кафедри фізики і методики викладання фізики, інформатики, астрономії, Вінницький державний педагогічний університет імені М.Коцюбинського, Вінниця, Україна.

ЯРЕМЧУК В.Ф. – к.т.н., доцент кафедри фізики і методики викладання фізики, інформатики, астрономії, Вінницький державний педагогічний університет імені М.Коцюбинського, Вінниця, Україна.

КРАВЧУК Н.С. – к.т.н., доцент кафедри фізики і методики викладання фізики, інформатики, астрономії, Вінницький державний педагогічний університет імені М.Коцюбинського, Вінниця, Україна.

ТУЖАНСЬКИЙ С.Є. – к.т.н., ст. викладач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна