

Яремчук В. Енергетичний потенціал та умови функціонування волоконно-оптичної системи, призначеної для визначення складу та концентрації газу / Яремчук В., Кравчук Н., Смішний С. // Вісник ТНТУ. — 2010. — Том 15. — № 3. — С. 119-123. — (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

УДК 683.3; 621.375; 543.272

**В.Яремчук, канд. техн. наук; Н.Кравчук, канд. техн. наук; С.Смішний**

*Вінницький державний педагогічний університет  
імені Михайла Коцюбинського*

## **ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ТА УМОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ, ПРИЗНАЧЕНОЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗУ**

*Резюме.* З метою отримання технічних характеристик і параметрів системи контролю й вимірювання концентрації газу, заснованої на оптично-абсорбційному методі з використанням волоконно-оптичних вузлів, визначено умови функціонування волоконно-оптичної системи, призначеної для визначення складу та концентрації газу.

*Ключові слова:* енергетичний потенціал, волоконно-оптична система, оптично-абсорбційний метод, концентрація, газ.

**V. Yaremchuk, N. Kravchuk; S. Smishnuy**

## **ENERGY POTENTIAL AND OPERATING CONDITIONS OF THE FIBER OPTICAL SYSTEM INTENDED FOR DETERMINATION OF COMPOSITION AND CONCENTRATION OF GAS**

*The summary.* With the purpose of reception of technical characteristics and parameters of the monitoring system and measurement of concentration of gas, based on optical-absorption method, with use of fiber optical knots, definitely operating conditions of the fiber optical system intended for determination of composition and concentration of gas.

*Key words:* energy potential, fibre optical system, optical-absorption method, concentration, gas.

**Постановка проблеми.** З бурхливим розвитком сенсорів фізичних величин, робота яких ґрунтується на використанні волоконно-оптичних ліній зв'язку, розширюється область їх застосування, зокрема в області газовимірювальної техніки. Розширення технічних можливостей обладнання на основі волоконно-оптичних систем підвищує точність та надійність оптичних методів дослідження речовин у промисловості. Розрахунок важливих параметрів волоконно-оптичних систем, призначених для визначення складу та концентрації газу, є першочерговим завданням при їх створенні. Вдосконалення математичних моделей таких систем, визначення умов застосування та метрологічних характеристик дає можливість покращити вихідні параметри. Важливим технічним параметром, який визначає можливість функціонування оптичних систем і пристроїв, є енергетичний потенціал системи. Саме від даного параметру залежить вибір основних та другорядних оптичних вузлів у побудові вимірювальної системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дана проблематика висвітлена у роботі [1], де визначено загальні та спеціалізовані критерії стабільності функціонування геоінформаційно-енергетичних мереж, в яких відсутня структурна ланка оптичного середовища (середовища з досліджуванним газом). У літературі [2] енергетичний потенціал апаратури описується нерівністю, що містить лише параметри волоконно-оптичних ліній зв'язку, без можливості проходження оптичного сигналу у відкритому каналі з середовищем.

**Мета роботи.** Визначення енергетичного потенціалу та умов функціонування системи контролю і вимірювання концентрації газу, яка заснована на оптично-абсорбційному методі вимірювання з використанням волоконно-оптичних вузлів.

**Постановка задачі.** З метою отримання технічних характеристик і параметрів системи контролю й вимірювання концентрації газу, заснованої на оптично-абсорбційному методі, з використанням волоконно-оптичних вузлів, необхідно:

– розглянути енергетичні характеристики системи, визначити умови функціонування волоконно-оптичної системи, призначеної для визначення складу та концентрації газу;

– отримати математичну рівність, що описує взаємозв'язок між довжиною волоконно-оптичного тракту, використаного у системі, мінімальною визначеною концентрацією та чутливістю приймача оптичного випромінювання, а також енергетичними втратами системи.

**Основний розділ.** Функціональна схема системи контролю і вимірювання концентрації газу, яка заснована на оптично-абсорбційному методі вимірювання з використанням волоконно-оптичних вузлів, зображена на рис.1.

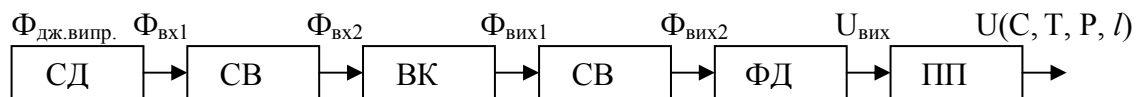


Рис. 1. Функціональна схема системи контролю і вимірювання концентрації газу (оптично-абсорбційний метод)

Вхідний потік  $\Phi_{\text{вх1}}$  оптичного випромінювання формується джерелом випромінювання (світлодіод (СД)), яке введене у світловод (СВ), потік  $\Phi_{\text{вх2}}$  надходить у вимірювальну комірку (ВК),  $\Phi_{\text{вих1}}$  – світловий потік, що виходить з вимірювальної комірки і надходить у вихідний світловод (СВ),  $\Phi_{\text{вих2}}$  – світловий потік, що надходить на фотоприймач (фотодіод (ФД)),  $U_{\text{вих}}$  – напруга вихідного сигналу, що надходить на перетворюючий пристрій (ПП), який враховує фактори впливу на вимірювання концентрації газу ( $U(C, T, P, l)$ ).  $\Phi_{\text{вх1}}$ ,  $\Phi_{\text{вх2}}$ ,  $\Phi_{\text{вих1}}$ ,  $\Phi_{\text{вих2}}$  – інтенсивність оптичного випромінювання у Вт;  $C$  – концентрація метану у вимірювальному оптичному каналі;  $l$  – товщина шару речовини, яка дорівнює довжині вимірювального каналу.

Розглянемо енергетичні характеристики системи, що впливають на результат вимірювання інформативного, а, отже, й контрольованого параметрів. З функціональної схеми (рис.1) випливає, що енергетичний потенціал системи запишеться як

$$\Phi_{\text{системи}} = \Phi_{\text{вх1}} - \Phi_s, \quad (1)$$

де  $\Phi_{\text{системи}}$  – енергетичний потенціал системи;  $\Phi_{\text{вх1}}$  – вихідна потужність волоконно-оптичного випромінюючого модуля (джерела випромінювання зі вихідним волокном);  $\Phi_s$  – мінімальна прийнята потужність на приймачі оптичного випромінювання або, що те ж саме, поріг чутливості фотоприймача.

У свою чергу, вихідну потужність волоконно-оптичного випромінюючого модуля  $\Phi_{\text{вх1}}$  визначають так:

$$\Phi_{\text{вх1}} = \Phi_{\text{дж.випр.}} - \Phi_{\text{введ.св.}}, \quad (2)$$

де  $\Phi_{\text{дж.випр.}}$  – потужність джерела оптичного випромінювання;  $\Phi_{\text{введ.св.}}$  – втрати потужності оптичного випромінювання при введенні у волокно.

Енергетичний потенціал системи має забезпечити всі втрати в усіх елементах оптичної системи та енергетичний апаратурний запас:

$$\Phi_{\text{системи}} = \Phi_{\text{вх1}} - \Phi_s = \sum_{i=1}^6 \Phi_i + \Phi_{\text{зан}}, \quad (3)$$

де  $\sum \Phi_i$  – сумарні енергетичні втрати в системі:  $\Phi_1$  – повні втрати в світловодах, використаних у системі;  $\Phi_2$  – втрати при виведенні випромінювання з волокна у приймач;  $\Phi_3$  – втрати на оптичних з’єднаннях;  $\Phi_4$  – допуски на температурні зміни характеристик елементів;  $\Phi_5$  – допуски на часову деградацію елементів;  $\Phi_6$  – втрати у вимірювальній комірці.

З виразу (3) випливає, що енергетичний апаратурний запас даної системи можна обчислити за таким рівнянням:

$$\Phi_{зан} = \Phi_{вх1} - \sum_{i=1}^6 \Phi_i - \Phi_s. \quad (4)$$

Величина  $\Phi_{зан}$  є сновним енергетичним параметром, який показує можливість функціонування системи. При від’ємному значенні  $\Phi_{зан}$  необхідно змінити елементну базу. Більше того, рівність (4) визначає мінімальну допустиму енергію, яку в змозі фіксувати приймач оптичного випромінювання з заданою пороговою чутливістю та заданими параметрами оптичних вузлів, такими, як довжина та втрати волокна на визначеній довжині хвилі, концентрація досліджуваного газу, довжина комірки тощо.

Повні енергетичні втрати  $\Phi_1$  у світловодах, використаних у системі,

$$\Phi_1 = \alpha L, \quad (5)$$

де  $\alpha$  – втрати оптичного випромінювання у світловоді на визначеній довжині хвилі, Вт/м;  $L$  – загальна довжина світловодів, м.

За умови  $\Phi_{зан} = 0$ , тобто коли пороговій чутливості приймача дорівнюватиме потужність сигналу, що до нього надходить, можна визначити максимальну загальну довжину  $L_{max}$  оптичного волокна при заданих параметрах оптичної системи та заданою концентрацією газу:

$$\begin{aligned} \Phi_{зан} = \Phi_{вх1} - \Phi_1 - \sum_{i=1}^5 \Phi_i - \Phi_s = \Phi_{вх1} - \alpha L_{max} - \sum_{i=1}^5 \Phi_i - \Phi_s, \\ 0 = \Phi_{вх1} - \alpha L_{max} - \sum_{i=1}^5 \Phi_i - \Phi_s, \end{aligned} \quad (6)$$

$$L_{max} = \frac{\Phi_{вх1} - \sum_{i=1}^5 \Phi_i - \Phi_s}{\alpha}. \quad (7)$$

Енергетичні втрати у вимірювальній комірці  $\Phi_6$  враховують:  $\Phi_{1к}$  – втрати оптичного випромінювання при переході світла з волокна у комірку;  $\Phi_{2к}$  – втрати на поглинанні та розсіюванні середовищем у комірці;  $\Phi_{3к}$  – втрати при введенні оптичного потоку з комірки у вихідне волокно. Тобто

$$\Phi_6 = \Phi_{1к} + \Phi_{2к} + \Phi_{3к}. \quad (8)$$

Величину ослабленого потоку випромінювання  $\Phi_{вк}$ , що пройшов через вимірювальну комірку з газом, можна визначити за законом Бугера-Ламберта-Бера, який зв’язує інтенсивності світлових потоків до та після проходження середовища з довжиною  $l$  та концентрацією досліджуваного газу  $C$  [3]:

$$\Phi_{вк} = (\Phi_{вх2} - \Phi_{1к}) e^{-\alpha_{газ} C l},$$

де  $(\Phi_{вх2} - \Phi_{1к})$  – величина потоку випромінювання до проходження досліджуваного середовища комірки;  $\Phi_{вк}$  – величина потоку інфрачервоного випромінювання, що пройшов середовище вимірювальної кювети, тобто потужність до введення оптичного потоку з комірки у вихідне волокно;  $C$  – концентрація газу у вимірювальному оптичному каналі;  $l$  – довжина поглинаючого шару, що дорівнює довжині вимірювальної кювети;  $\alpha_{газ}$  – коефіцієнт поглинання газу, який залежить від ступеня узгодження спектрів поглинання газу, спектральної характеристики джерела інфрачервоного випромінювання і спектральної чутливості приймача інфрачервоного

випромінювання, а також від температури  $T$ ,  $K$  та тиску  $P$ , кПа атмосфери, тобто  $\alpha_{\text{газ}}(\lambda, T, P)$ .

Тоді  $\Phi_{2\kappa}$  можна виразити з урахуванням закону Бугера-Ламберта-Бера

$$\Phi_{2\kappa} = (\Phi_{\text{ex}2} - \Phi_{1\kappa}) - ((\Phi_{\text{ex}2} - \Phi_{1\kappa})e^{-\alpha_{\text{газ}}Cl}), \quad (9)$$

де  $(\Phi_{\text{ex}2} - \Phi_{1\kappa})$  – величина потоку випромінювання при переході з волокна у комірку;  $((\Phi_{\text{ex}2} - \Phi_{1\kappa})e^{-\alpha_{\text{газ}}Cl})$  – величина потоку інфрачервоного випромінювання, що пройшов середовище вимірювальної кювети, тобто потужність до введення оптичного потоку з комірки у вихідне волокно. Переписавши (6) з урахуванням втрат у комірці

$$0 = \Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_{\text{max}} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_6$$

та підставивши в отриманий результат рівність (8), отримаємо:

$$0 = \Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_{\text{max}} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - (\Phi_{1\kappa} + \Phi_{2\kappa} + \Phi_{3\kappa});$$

$$0 = \Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_{\text{max}} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{1\kappa} - \Phi_{2\kappa} - \Phi_{3\kappa};$$

$$\Phi_{2\kappa} = \Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_{\text{max}} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{1\kappa} - \Phi_{3\kappa}, \quad (10)$$

або з урахуванням (9):

$$(\Phi_{\text{ex}2} - \Phi_{1\kappa}) - ((\Phi_{\text{ex}2} - \Phi_{1\kappa})e^{-\alpha_{\text{газ}}Cl}) = \Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_{\text{max}} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{1\kappa} - \Phi_{3\kappa}. \quad (11)$$

Оскільки  $\Phi_{\text{ex}2} = \Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_1$ , де  $L_1$  – довжина вхідного волокна, м (волокна до комірки), то рівність (11) матиме вигляд:

$$(\Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa}) - ((\Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa})e^{-\alpha_{\text{газ}}Cl}) = \Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_{\text{max}} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{1\kappa} - \Phi_{3\kappa};$$

$$(-\alpha L_1) - ((\Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa})e^{-\alpha_{\text{газ}}Cl}) = -\alpha L_{\text{max}} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{3\kappa};$$

$$-((\Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa})e^{-\alpha_{\text{газ}}Cl}) = -\alpha L_{\text{max}} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{3\kappa} + \alpha L_1;$$

$$(\Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa})e^{-\alpha_{\text{газ}}Cl} = \alpha L_{\text{max}} + \sum_{i=1}^4 \Phi_i + \Phi_s + \Phi_{3\kappa} - \alpha L_1; \quad (12)$$

$$e^{-\alpha_{\text{газ}}Cl} = \frac{\alpha L_{\text{max}} + \sum_{i=1}^4 \Phi_i + \Phi_s + \Phi_{3\kappa} - \alpha L_1}{(\Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa})};$$

$$-\alpha_{\text{газ}}Cl = \ln \left[ \frac{\alpha L_{\text{max}} + \sum_{i=1}^4 \Phi_i + \Phi_s + \Phi_{3\kappa} - \alpha L_1}{(\Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa})} \right];$$

$$C = \frac{\ln \left[ \frac{\alpha L_{\text{max}} + \sum_{i=1}^4 \Phi_i + \Phi_s + \Phi_{3\kappa} - \alpha L_1}{(\Phi_{\text{ex}1} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa})} \right]}{-\alpha_{\text{газ}}l}$$

або

$$C = \frac{\ln \left[ \frac{(\Phi_{\text{ex1}} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa})}{\alpha L_{\text{max}} + \sum_{i=1}^4 \Phi_i + \Phi_s + \Phi_{3\kappa} - \alpha L_1} \right]}{\alpha_{\text{газ}} l} \quad (13)$$

Отримане співвідношення виражає взаємозв'язок між довжиною волоконно-оптичного тракту  $L_{\text{max}}$ , використаного у системі, мінімальною визначеною концентрацією  $C$  та чутливістю приймача  $\Phi_s$  оптичного випромінювання, а також енергетичними втратами системи  $\Phi_i$ .

Для визначення максимальної загальної довжини  $L_{\text{max}}$  оптичного волокна при заданих параметрах оптичної системи та заданою концентрацією газу з урахуванням закону Бугера-Ламберта-Бера використаємо рівність (12)

$$\begin{aligned} (\Phi_{\text{ex1}} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa}) e^{-\alpha_{\text{газ}} C l} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{3\kappa} + \alpha L_1 &= \alpha L_{\text{max}}; \\ L_{\text{max}} &= \frac{(\Phi_{\text{ex1}} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa}) e^{-\alpha_{\text{газ}} C l} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{3\kappa} + \alpha L_1}{\alpha}. \end{aligned} \quad (14)$$

Оскільки  $L_{\text{max}} = L_1 + L_2$ , де  $L_1$  – довжина вхідного волокна, м (волокна до комірки);  $L_2$  – довжина вихідного волокна, м (волокна після комірки), то рівняння (14) матиме вигляд

$$\begin{aligned} L_1 + L_2 &= \frac{(\Phi_{\text{ex1}} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa}) e^{-\alpha_{\text{газ}} C l} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{3\kappa} + \alpha L_1}{\alpha} \\ \alpha L_1 + \alpha L_2 &= (\Phi_{\text{ex1}} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa}) e^{-\alpha_{\text{газ}} C l} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{3\kappa} + \alpha L_1; \\ \alpha L_2 &= (\Phi_{\text{ex1}} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa}) e^{-\alpha_{\text{газ}} C l} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{3\kappa}; \\ L_2 &= \frac{(\Phi_{\text{ex1}} - \alpha L_1 - \Phi_{1\kappa}) e^{-\alpha_{\text{газ}} C l} - \sum_{i=1}^4 \Phi_i - \Phi_s - \Phi_{3\kappa}}{\alpha}. \end{aligned} \quad (15)$$

Отриманий вираз дає можливість визначити довжину волокна  $L_2$  після комірки при заданій довжині оптичного волокна  $L_1$  до комірки та параметрах оптичної системи, що важливо для розрахунків таких систем.

**Висновки.** З метою отримання технічних характеристик і параметрів системи контролю й вимірювання концентрації газу, заснованої на оптично-абсорбційному методі з використанням волоконно-оптичних вузлів, розглянуто енергетичні характеристики системи, визначено умови функціонування волоконно-оптичної системи, призначеної для визначення складу та концентрації газу.

Отримано математичну рівність, що описує взаємозв'язок між довжиною волоконно-оптичного тракту, використаного у системі, мінімальною визначеною концентрацією та чутливістю приймача оптичного випромінювання, а також енергетичними втратами системи.

#### Література

1. Кожем'яко В.П. Критерії стабільного функціонування оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж / В.П. Кожем'яко, В.І. Маліновський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №6. – С. 108–110.
2. Андрушко Л.М. Волоконно-оптические линии связи / Л.М. Андрушко, И.И. Гроднев, И.П. Панфилов. – М.: Радио и связь, 1984. – 135с.

3. Бахшиев Н. Г. Введение в молекулярную спектроскопию: учеб. пособие / Н. Г. Бахшиев. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987. – 216с.

*Отримано 29.06.2010 р.*