

УДК 621.311.25

## ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ АНАЛІЗАТОРА ВОЛОГОСТІ ГАЗУ

Й. Й. Білинський<sup>1</sup>, О. С. Городецька<sup>1</sup>, В. В. Онушко<sup>2</sup>

1) Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21010, тел. (0432)598-358, e-mail: [biloshkursky@ukr.net](mailto:biloshkursky@ukr.net)

2) ДП «Укрметртестстандарт», вул. Метрологічна, 4, м. Київ, тел. (044)526-53-86

Запропоновано двоканальний аналізатор вологості газу, підвищення чутливості та точності якого забезпечується шляхом використання логарифмічного підсилювача і оберненого зв'язку. Отримано функцію перетворення такого аналізатора.

Ключові слова: відносна вологість, водяна пара, сухий газ, тиск, температура, показник поглинання, коефіцієнт пропускання, логарифмічний підсилювач, питомий молярний показник поглинання, густина.

Предложено двухканальный анализатор влажности газа, повышение чувствительности и точности которого обеспечивается путем использования логарифмического усилителя и обратной связи. Получено функцию преобразования такого анализатора.

Ключевые слова: относительная влажность, водяной пар, сухой газ, давление, температура, показатель поглощения, коэффициент пропускания, логарифмический усилитель, удельный молярный показатель поглощения, плотность.

A two-channel gas analyzer has been developed. Increase the sensitivity and accuracy this device is assured by the use of logarithmic amplifier and feedback. The transfer function of the analyzer has been received.

The Keywords: relative humidity, water vapor, dry gas, pressure, temperature, absorbance, transmittance, logarithmic amplifier, specific molar absorption index, density.

На сьогодні все більш поширеними стають спектральні аналізатори якості (чистоти) хімічних продуктів, переважна більшість яких працює в ближній інфрачервоній (ІЧ) області. Специфічність ІЧ-спектра полягає у тому, що поглинання випромінювання залежить не тільки від всієї молекули в цілому, але і від наявності в ній певних груп атомів, навіть окремих зв'язків між атомами [1, 2].

Принципи вимірювання спектральним методом залишаються незмінними, хоча конструкція аналізаторів одержала подальший розвиток, в основному в частині електроніки.

Ослаблення монохроматичного випромінювання газом або рідиною описується законом Бугера-Ламберта-Бера, виходячи з якого для отримання необхідної чутливості й точності потрібно виконати вибір довжини хвилі, на якій відбувається найбільше поглинання випромінювання залежно від контрольованого компонента середовища, а також довжину ходу оптичного променя, яка може становити від десятків сантиметрів до метра, що суттєво збільшує габарити аналізатора [3].

Метою роботи є підвищення чутливості й точності газового аналізатора на основі використання оберненого зв'язку при збереженні його габаритних розмірів.

В основі методу абсорбційної спектроскопії, як відомо, лежить явище вибіркового поглинання багатоатомними молекулами випромінювання при його проходженні через середовище, яке відбувається на тих хвилях, частота яких є резонансною для відповідних молекул. Модель перенесення випромінювання в газовому середовищі може бути описана, виходячи з закону Бугера-Ламберта-Бера залежністю, яка наведена в [4], таким чином:

$$I(\nu) = I_0 e^{-\frac{dL_{(c)}}{P_{(c)} T} \left( K_{(v)}^{\nu, n} \frac{\rho_{\nu, n(c)} (P - P_{\nu, n, \max})}{\mu_{\nu, n}} + K_{(v)}^{\nu, c} \frac{\rho_{c, z(c)} (P - P_{\nu, n, \max})}{\mu_{c, z}} \right)}, \quad (1)$$

де  $\rho_{c, z(c)}$ ,  $\rho_{\nu, n(c)}$  – густина сухого газу та водяної пари за стандартних умов, відповідно;  $K_{(v)}^{\nu, c}$ ,  $K_{(v)}^{\nu, n}$  – питомі молярні показники поглинання природного сухого газу та водяної пари на частоті  $\nu$ , відповідно;  $\mu_{c, z}$ ,  $\mu_{\nu, n}$  – молекулярні маси природного сухого газу та

водяної пари, відповідно;  $d$  – товщина шару газу, через який проходить пучок інтенсивності світла  $I_0$ ;  $P, T, \Phi$  – тиск, температура та відносна вологість газу, відповідно;  $P_{(c)}, T_{(c)}$  – тиск і температура газу за стандартних умов, відповідно.

Для підвищення чутливості й точності газового аналізатора в роботі запропоновано використати схему з оберненим зв'язком. Структурна схема аналізатора наведена на рис. 1.

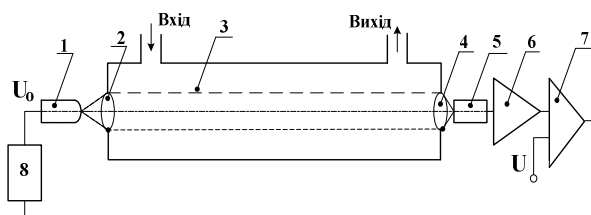


Рисунок 1 – Структурна схема газового аналізатора з оберненим зв'язком

Світловий потік в аналізаторі за допомогою випромінювача 1, який є функцією параметрів затухання вологого газу 3, проходить через оптичну систему 2, 4, перетворюється в електричний сигнал на виході фотоприймача 5, підсилюється та подається на логарифмічний підсилювач 6. Функція перетворення цього процесу описується так:

$$U = I_0 \tau_{ocv} \tau_z \tau_{cc} \tau_{ocf} SK_{III}, \quad (2)$$

де  $I_0$  – світловий потік випромінювача;  $\tau_{ocv}$ ,  $\tau_{ocf}$  – коефіцієнти пропускання оптичної системи вимірювача та фотоприймального каналу, відповідно;  $\tau_z$  – коефіцієнт пропускання газу;  $\tau_{cc}$  – коефіцієнт пропускання фільтра виділення спектрального інтервалу;  $S$  – інтегральна чутливість фото приймального пристрою;  $K_{III}$  – коефіцієнт передачі попереднього підсилювача.

Коефіцієнт пропускання газу визначається як відношення інтенсивності світлового потоку, який пройшов через кювету з газом, до інтенсивності світлового потоку, який пройшов через кювету без газу, тобто

$$\tau_z(v) = \frac{I(v)}{I_0(v)} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Оскільки всі вищевказані коефіцієнти пропускання для відповідного спектрального діапазону є величинами сталими, окрім коефіцієнта пропускання газу, то вираз (2)

можна записати через загальний коефіцієнт пропускання та оптронної системи  $\tau_0$  і з урахуванням формули (3) так:

$$U = I(v) \tau_0 SK. \quad (4)$$

З метою лінеаризації, підвищення чутливості функції перетворення введено логарифмічний підсилювач 6. Оскільки затухання світлового потоку описується експоненціальною залежністю, то логарифмічний підсилювач виконує функцію логарифмування. Тоді, формула (4), на підставі (1), набуде вигляду

$$U(v_1) = K_1 L n \frac{I_0 \tau_0 SK_{III} e^{\left( \frac{dT_{(c)}}{P_{(c)} T} \left( \frac{K_{(v_1)}^{c.z.} \rho_{(c)}^{c.z.} (P - \varphi_{e.n. max}) + \mu_{c.z.}}{+ K_{(v_1)}^{e.n.} \rho_{(c)}^{e.n.} \varphi_{e.n. max} \mu_{e.n.} \right) \right)}}{K_2}, \quad (5)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт, що дорівнює вихідній напрузі логарифмічного підсилювача при  $U_{ex}/K_2 = e$ , тобто основі натурального логарифма;  $K_2$  – коефіцієнт, що дорівнює такому значенню вхідної напруги, при якому вихідна напруга  $U_{вих} = 0$ .

На рис. 2 наведені залежності вихідної напруги аналізатора від відносної вологості газу при одиничному значенні вхідної інтенсивності без використання  $U(v)$  та з використанням  $U(v_1)$  логарифмічного підсилювача. При цьому використані значення питомих молярних показників поглинання природного сухого газу та водяної пари, які отримані в роботі [5].

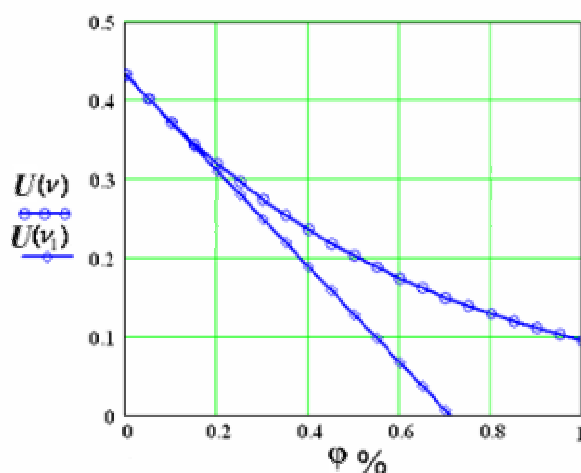


Рисунок 2 – Залежність вихідної напруги газового аналізатора від відносної вологості

Таким чином встановлено, що використання

логарифмічного підсилювача (на підставі залежності (5) і рис. 2) дає змогу лінеаризувати вихідну функцію та підвищити чутливість такого перетворення при збереженні габаритних розмірів аналізатора, тобто, товщини шару газу проходження світлового потоку  $d$ .

Метод оберненого зв'язку передбачає використання функції, оберненої заданій функції перетворення, що дозволяє підвищити точність. Якщо функція прямого перетворення  $Y = F_0(X)$ , то обернений перетворювач повинен реалізувати функцію  $X_k = F_0^{-1}(Y)$ , де  $X_k$  – вихідний сигнал оберненого перетворення,  $Y$  – вихідний сигнал прямого перетворення. Тоді величина  $\Delta X = X - X_k = X - F_0^{-1}(Y)$  називається сигналом некомпенсації або неузгодження та є функцією похибки прямого перетворення. Сигнал некомпенсації  $\Delta X$  використовується для корекції вихідного сигналу корекції [6]. Таким чином, для отримання сигналу некомпенсації  $\Delta X$  в аналізатор введено схему порівняння 7, вихід якого по оберненому зв'язку пов'язаний з схемою керування живлення 8 випромінювача 1. Вихідним сигналом оберненого перетворення в такому випадку буде напруга живлення  $U_0$ , що подається на вхід випромінювача 1 і яка змінюється залежно від величини відносної вологості  $\phi$ . Тоді функція перетворення (5) набуде такого вигляду:

$$U(v_1) = K_2 e^{\frac{U_0 + K_2 \frac{dT_{(c)}}{P_{(c)}} T}{K_1} \left( \frac{K_{(v_1)}^{c.z.} \rho_{(c)}^{c.z.} (P - \phi P_{e.n. \max})}{\mu_{c.z.}} + \frac{K_{(v_1)}^{e.n.} \rho_{(c)}^{e.n.} \phi P_{e.n. \max}}{\mu_{e.n.}} \right)} \quad (6)$$

Залежність вихідної напруги аналізатора від відносної вологості газу та величини вхідної напруги наведено на рис. 3.

Двоканальна система газового аналізатора може бути описана виразом (6) для вимірювального каналу та аналогічною функцією для опорного каналу, а саме:

$$U(v_2) = K_4 e^{\frac{U_0 + K_4 \frac{dT_{(c)}}{P_{(c)}} T}{K_3} \left( \frac{K_{(v_2)}^{c.z.} \rho_{(c)}^{c.z.} (P - \phi P_{e.n. \max})}{\mu_{c.z.}} + \frac{K_{(v_2)}^{e.n.} \rho_{(c)}^{e.n.} \phi P_{e.n. \max}}{\mu_{e.n.}} \right)} \quad (7)$$

де  $K_3$  і  $K_4$  – коефіцієнти функціонального перетворювача опорного каналу, які є аналогічними коефіцієнтам  $K_1$ ,  $K_2$  логарифмічного

підсилювача вимірювального каналу;  $K_{(v_2)}^{c.z.}$ ,  $K_{(v_2)}^{e.n.}$  – питомі молярні показники поглинання природного сухого газу та водяної пари опорного каналу, відповідно.

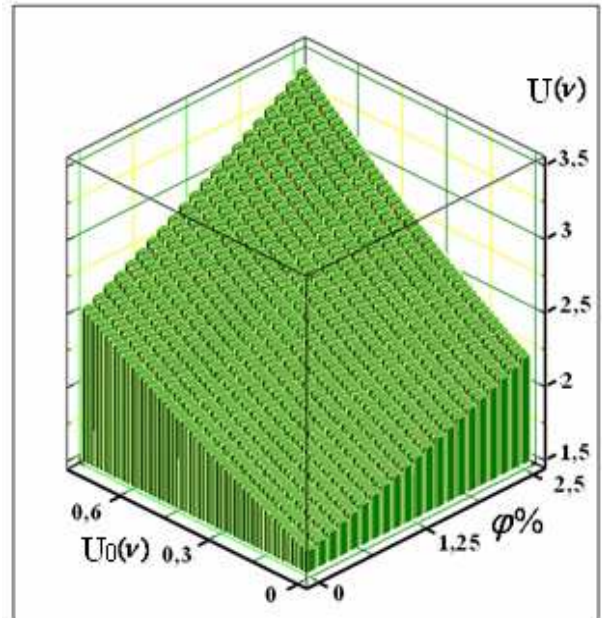


Рисунок 3 – Залежність вихідної напруги газового аналізатора від відносної вологості та величини вхідної напруги

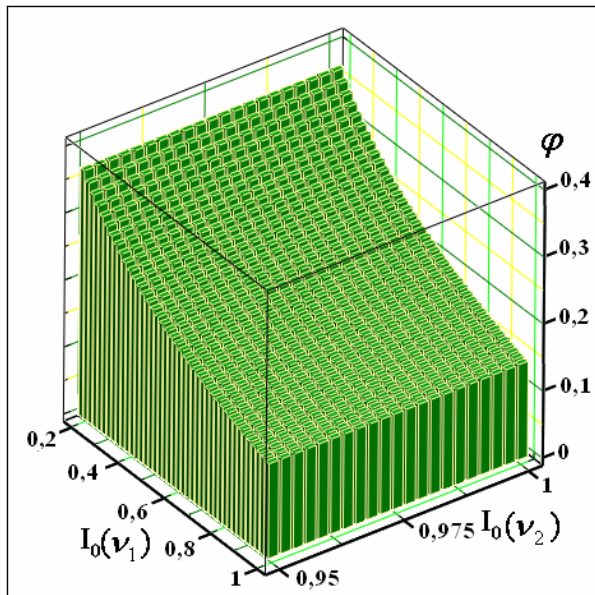
Відносна вологість двоканального аналізатора вологості на підставі виразів (4), (6) і (7) описується таким виразом:

$$\phi = \frac{\mu_{e.n.} P_{c.TZ} \cdot \left( K_{(v_2)}^{c.z.} g_3 \left( \ln \frac{I_0(v_1) \tau_0 S K_{III}}{K_2} - \frac{U(v_1)}{K_1} \right) - \left( -K_{(v_1)}^{c.z.} g_1 \left( \ln \frac{I_0(v_2) \tau_0 S K_{III}}{K_4} - \frac{U(v_2)}{K_3} \right) \right) \right)}{d K_1 K_3 T_{c.P_{e.n. \max}} \left( K_{(v_1)}^{c.z.} \cdot K_{(v_2)}^{e.n.} - K_{(v_1)}^{e.n.} \cdot K_{(v_2)}^{c.z.} \right) \cdot \rho_{e.n.(c)}} \quad (8)$$

При цьому коефіцієнт стисливості визначається як  $Z = g/g_{(c)}$ , де  $g$  і  $g_{(c)}$  – фактори стисливості, відповідно за робочих і стандартних умов [7].

На рис. 4 наведена тривимірна залежність відносної вологості від вхідних інтенсивностей випромінювачів вимірювального та опорного каналу аналізатора.

Перевірка отриманих значень відносної вологості на основі (8) виконана відносно рівняння (5), яке використовує значення температури точки роси в [8, 9] та відносної вологості.



**Рисунок 4 – Тривимірна залежність відносної вологості від вихідних інтенсивностей вимірювального та опорного каналу аналізатора**

На підставі отриманої формули перетворення (8) і тривимірної залежності (рис. 4) можна зробити висновок про підвищення чутливості в 3-3,5 разів при використанні схемного рішення, запропонованого в роботі, у порівнянні з газовим аналізатором, який має аналогічні параметри, описаного залежністю (5).

Максимальне відхилення розрахованих значень відносної вологості від значень на основі залежностей із [8, 9] не перевищує 3%.

### ВИСНОВКИ

Запропоновано функцію перетворення двоканального аналізатора вологості газу, який містить обернений зв'язок і логарифмічний підсилювач і який, на відміну від відомого, дозволяє підвищити чутливість в 3-3,5 разів.

Виконано перевірку отриманих значень відносної вологості згідно залежності (8) відносно рівняння визначення температури точки роси в [8, 9], максимальне відхилення розрахованих значень відносної вологості не перевищує 3%.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що використання двоканальної системи дає змогу покращити метрологічні характеристики інфрачервоного аналізатора.

1 Селезнев С.В. Анализ методов и средств измерения влажности и точек росы природного газа / С.В.Селезнев // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений : научно-технический сб. – 2005. – №2. – С. 10-22. 2 Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с. 3 Пеклер В. В. Состояние и перспективы развития гигрометров и средств их метрологического обеспечения / В. В. Пеклер, Г. М. Мамонтов // Датчики и системы. – 2006. – №1. – С. 33-38. 4 Білінський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й.Й. Білінський, В.В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №5. – С.18-22. 5 Білінський Й. Й. Математична модель аналізатора вологості природного газу / Й. Й. Білінський, В. В. Онушко // Наукові праці ВНТУ – 2010. – №4. – Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2010-4/uk.htm>. 6 Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / П.П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1980. – 560 с. 7 Андрійшин М.П. Вимірювання витрат та кількості газу: Довідник/ М.П. Андрійшин, С. О. Канєвський, О. М. Карпаш [та ін.]. – Івано-Франківськ: ПП «Сімік», 2004. – 160 с. 8 Лесовий Л. В. Визначення відносної вологості газу для вузлів обліку із застосуванням засобів вимірювання температури точки роси. / Л. В. Лесовий, Ф.Д. Матіко // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – №659. – С. 84-91. 9 ГОСТ 20060-83. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги.

**Поступила в редакцію 07.12.2010 р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Кісіль І. С.**