

Й. Й. Білинський, д-р техн. наук, проф.;  
 О. С. Городецька, канд. техн. наук, доц.;  
 В. В. Онушко,  
 Б. П. Книш, студ.

## ДВОКАНАЛЬНИЙ АНАЛІЗАТОР ВОЛОГОСТІ ГАЗУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО СТАТИЧНИХ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Запропоновано інфрачервоний двоканальний аналізатор вологості газу з використанням оберненого зв'язку, отримано функцію перетворення, статичні метрологічні характеристики, а саме: номінальну функцію перетворення, абсолютну та відносну похибки нелінійності, абсолютні мультиплікативну та адитивну похибки.

### Вступ

Прилади для вимірювання вологості газових середовищ широко використовуються практично у всіх галузях людської діяльності: у промисловості, сільському господарстві, метеорології, музеях, бібліотеках, сховищах тощо. Особливо гостро завдання вимірювання вологості газів постає в таких галузях, як мікроелектроніка, атомна енергетика, хімічна промисловість, а також у транспортуванні природного газу [1, 2].

Аналіз методів вимірювання вологості газу [3—5] показує, що на сьогодні одним з найперспективніших є спектральний метод. Специфіка галузей застосування аналізаторів вологості висуває особливі вимоги до функціональних характеристик фотоприймачів, що використовуються в їх складі. Використання інфрачервоного діапазону для вимірювання вологості газу є виправданим за умови реєстрації його тиску і температури.

Метою роботи є розробка двоканального аналізатора вологості газу та дослідження його статичних метрологічних характеристик.

### Матеріали та результати досліджень

В роботі запропоновано інфрачервоний аналізатор вологості, який містить два рівноцінних канали: перший — вимірювальний, налаштований на робочу довжину хвилі ( $\nu_1$ ), а другий — на опорну ( $\nu_2$ ).

Вихідна інтенсивність вимірювального каналу згідно з [6] визначається як

$$I(\nu_1) = I_0(\nu_1) e^{-d(K_{(\nu_1)}^{B.П.} C_{B.П.} + K_{(\nu_1)}^{C.Г.} C_{C.Г.})} = I_0 e^{-d\left(K_{(\nu_1)}^{B.П.} \frac{\rho_{B.П.}}{\mu_{B.П.}} + K_{(\nu_1)}^{C.Г.} \frac{\rho_{C.Г.}}{\mu_{C.Г.}}\right)}. \quad (1)$$

Вихідна інтенсивність опорного каналу визначається як

$$I(\nu_2) = I_0(\nu_2) e^{-d\left(K_{(\nu_2)}^{B.П.} C_{B.П.} + K_{(\nu_2)}^{C.Г.} C_{C.Г.}\right)} = I_0 e^{-d\left(K_{(\nu_2)}^{B.П.} \frac{\rho_{B.П.}}{\mu_{B.П.}} + K_{(\nu_2)}^{C.Г.} \frac{\rho_{C.Г.}}{\mu_{C.Г.}}\right)}, \quad (2)$$

де  $K_{(\nu_1)}^{C.Г.}$  і  $K_{(\nu_1)}^{B.П.}$ ,  $K_{(\nu_2)}^{C.Г.}$  і  $K_{(\nu_2)}^{B.П.}$  — питомі молярні показники поглинання природного сухого газу та водяної пари вимірювального та опорного каналу;  $I_0(\nu_1)$ ,  $I_0(\nu_2)$  — світловий потік випромінювача на частотах  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ , відповідно;  $d$  — товщина шару газу, через який проходить пучок інтенсивності світла  $I_0$ ;  $C_{C.Г.}$ ,  $C_{B.П.}$  — концентрація сухого газу та водяної пари, відповідно;  $\rho_{C.Г.(c)}$ ,  $\rho_{B.П.(c)}$  — густини сухого газу та водяної пари за стандартних умов, відповідно;  $\mu_{C.Г.}$ ,  $\mu_{B.П.}$  — молекулярні маси природного сухого газу та водяної пари відповідно.

Відносна вологість природного газу визначається за формулою [7]

$$\phi = \frac{\mu_{B.П.} p_c T Z \left( K_{(\nu_2)}^{C.Г.} K_3 \left( \ln \frac{I_0(\nu_1) \tau_0 S K_{ПП}}{K_2} - \frac{U(\nu_1)}{K_1} \right) - K_{(\nu_1)}^{C.Г.} K_1 \left( \ln \frac{I_0(\nu_2) \tau_0 S K_{ПП}}{K_4} - \frac{U(\nu_2)}{K_3} \right) \right)}{d K_1 K_3 T_c p_{B.П.(max)} \left( K_{(\nu_1)}^{C.Г.} \cdot K_{(\nu_2)}^{B.П.} - K_{(\nu_1)}^{B.П.} \cdot K_{(\nu_2)}^{C.Г.} \right) \rho_{B.П.(c)}}, \quad (3)$$

де  $p_c$ ,  $T_c$  — тиск і температура газу за стандартних умов;  $T$  — температура газу;  $Z$  — коефіцієнт стисливості;  $K_1$ ,  $K_3$  — коефіцієнти перетворення вимірювального та опорного каналів;  $K_2$ ,  $K_4$  — коефіцієнти перетворення вимірювального та опорного каналів, аналогічні коефіцієнтам  $K_1$ ,  $K_2$ , де  $K_2 = \frac{K_1}{e}$ ,  $K_4 = \frac{K_3}{e}$ ;  $\tau_0$  — коефіцієнт пропускання оптичної системи;  $S$  — інтегральна чутливість фотоприймального пристрою;  $K_{ПП}$  — коефіцієнт передачі попереднього підсилювача;  $U(v_1)$ ,  $U(v_2)$  — вихідна напруга аналізатора на частоті  $v$ , відповідно;  $p_{в.п.(max)}$  — максимальний тиск водяної пари.

Формула перетворення (3) дозволяє визначити відносну вологість газу, не враховуючи ні густину суміші газів, ні його молекулярну масу, ані тиск, що істотно спрощує процес вимірювання.

На рис. 1 показана теоретична статична характеристика  $\varphi = f(I_0(v_1))$  за функцією перетворення. Крива перетворення є нелінійною. На лінійність характеристики впливає нелінійність залежності вологості газу від світлового потоку випромінювача та коефіцієнтів перетворення вимірювального та опорного каналів.

Для визначення вологості природного газу розроблений пристрій, структурна схема якого наведена на рис. 2. Схема аналізатора вологості двоканальна і складається з опорного і вимірювального каналів.

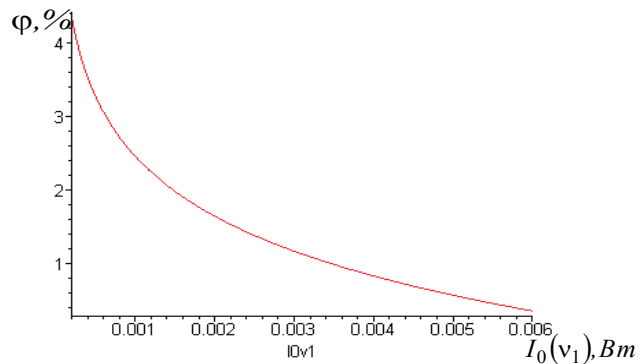


Рис. 1. Теоретична статична характеристика

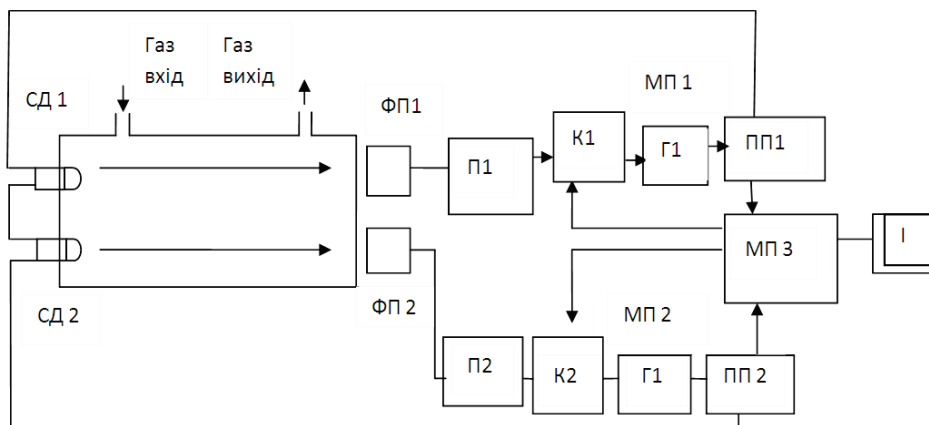


Рис. 2. Структурна схема аналізатора вологості природного газу

Структурна схема аналізатора вологості містить СД1 і СД2 — лазерні світлодіоди, налаштовані на вимірювану і опорну довжину хвилі, відповідно; ФП1 і ФП2 — фотоприймачі, П1 і П2 — попередні підсилювачі вимірювального і опорного каналів; К1 і К2 — комутатори вимірювального і опорного каналів; Г1 і Г2 — керувані генератори вимірювального і опорного каналів; ПП1 і ПП2 — підсилювачі потужності вимірювального і опорного каналів; МП — мікропроцесор та І — індикаторний пристрій.

Аналізатор вологості працює таким чином. Лазерний світлодіод СД1 випромінює інфрачервоне світло на вимірювальній довжині хвилі, яке проходить через вимірювальне середовище (природний газ) і потрапляє на фотоприймач ФП1 вимірювального каналу. Фотоприймач ФП1 перетворює падаючий на нього світловий потік в електричний сигнал, який підсилюється попереднім підсилювачем П1 і за допомогою комутатора К1, потрапляє на керуваний генератор Г1. На виході генератора формується імпульсно-частотний сигнал, частота якого змінюється в залежності від величини електричного сигналу. Імпульсно-частотний сигнал потрапляє в підсилювач потужності ПП1, підсилюється в струмовий електричний сигнал і поступає на лазерний світлодіод СД1.

Крім того, електричний сигнал від підсилювача потужності ПП1 потрапляє на мікропроцесор МП,

де запам'ятовується. Вимірювальний канал, охоплений глибоким від'ємним зворотним зв'язком, світловий потік F1, що випромінюється лазерним світлодіодом СД1, проходить через вимірювальне середовище і потрапляє на фотоприймач ФП1, підтримується постійним. Мікропроцесор МП переключас канали вимірювального та опорного каналів за допомогою комутаторів К1 і К2 циклічно.

У разі включення комутатора К2 вступає в роботу опорний канал і виходить з роботи вимірювальний канал — комутатор К1 виключається. Випромінюваний світлодіодом СД2 світловий потік проходить через вимірювальне середовище, ослаблюється за рахунок наявності в природному газі вологи і потрапляє на фотоприймач ФП2 опорного каналу. Фотоприймач ФП2 перетворює падаючий на нього потік в електричний сигнал, який проходить такі ж перетворення, як і у вимірювальному каналі. Опорний канал охоплений глибоким від'ємним зворотним зв'язком, тому світловий потік, що потрапляє на фотоприймач ФП2, залишається постійним. При цьому електричний сигнал з підсилювача потужності ПП2 потрапляє на мікропроцесор МП і порівнюється з електричним сигналом від підсилювача потужності вимірювального каналу ПП1. Отриманий від порівняння сигнал обробляється за алгоритмом на основі математичної моделі [8] і результат обробки у вигляді значень відносної вологості або масової частки видається на індикаторний пристрій І. На рис. 3 зображено зовнішній вигляд сенсора аналізатора вологості природного газу.

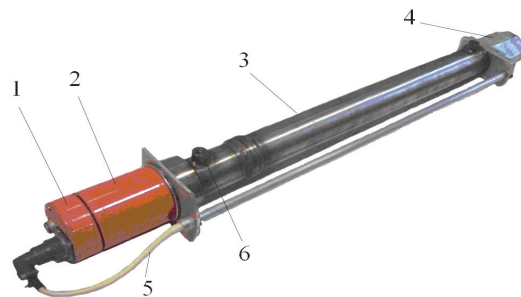


Рис. 3. Зовнішній вигляд сенсора аналізатора вологості природного газу: 1 — попередній підсилювач; 2 — головка фотодіодів; 3 — корпус; 4 — головка світлодіодів; 5 — кабель під'єднання до вторинного перетворювача; 6 — вхідний і вихідний газовий отвір

Для дослідження статичних метрологічних характеристик аналізатора вологості газу скористаємося розкладом функції перетворення (3) в ряд Тейлора [8].

Функцію перетворення (3) можна подати у вигляді

$$\phi = f \left( I_0(v_1), \Delta I_0(v_2), \Delta T, \Delta K_{(v_1)}^{c.r.}, \Delta K_{(v_2)}^{c.r.}, \Delta K_{(v_1)}^{b.p.}, \Delta K_{(v_2)}^{b.p.}, \Delta K_1, \Delta K_2, \Delta K_3, \Delta K_4, \Delta \tau_0, \Delta S, \Delta K_{ПП}, \Delta d, \Delta T_c, \Delta p_{в.п.(max)}, \Delta p_{в.п.(c)} \right), \quad (4)$$

де  $\phi$  — вихідна величина засобу контролю;  $I_0(v_1)$  — вхідна величина засобу контролю;

$\Delta I_0(v_2), \Delta T, \Delta K_{(v_1)}^{c.r.}, \Delta K_{(v_2)}^{c.r.}, \Delta K_{(v_1)}^{b.p.}, \Delta K_{(v_2)}^{b.p.}, \Delta K_1, \Delta K_2, \Delta K_3, \Delta K_4, \Delta \tau_0, \Delta S, \Delta K_{ПП}, \Delta d, \Delta T_c, \Delta p_{в.п.(max)}, \Delta p_{в.п.(c)}$  — впливні величини.

Розкладемо функцію перетворення (3) в ряд Тейлора і отримаємо:

$$\begin{aligned} \phi = & \phi_0 + \left[ \frac{\partial \phi}{\partial I_0(v_1)} \right]_0 I_0(v_1) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1)^2} \right]_0 I_0(v_1)^2 + \frac{1}{6} \left[ \frac{\partial^3 \phi}{\partial I_0(v_1)^3} \right]_0 I_0(v_1)^3 + \dots + \\ & + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial I_0(v_2)} \right]_0 I_0(v_1) \Delta I_0(v_2) + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial T} \right]_0 I_0(v_1) \Delta T + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial K_{(v_1)}^{c.r.}} \right]_0 h \Delta K_{(v_1)}^{c.z.} + \\ & + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial K_{(v_2)}^{c.z.}} \right]_0 I_0(v_1) \Delta K_{(v_2)}^{c.r.} + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial K_{(v_1)}^{b.p.}} \right]_0 I_0(v_1) \Delta K_{(v_1)}^{b.p.} + \\ & + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial K_{(v_1)}^{b.p.}} \right]_0 I_0(v_1) \Delta K_{(v_2)}^{b.p.} + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial K_1} \right]_0 I_0(v_1) \Delta K_1 + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial K_2} \right]_0 I_0(v_1) \Delta K_2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial K_3} \right]_0 I_0(v_1) \Delta K_3 + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial K_4} \right]_0 I_0(v_1) \Delta K_4 + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial \tau_0} \right]_0 I_0(v_1) \Delta \tau_0 + \\
& + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial S} \right]_0 I_0(v_1) \Delta S + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial K_{\text{III}}} \right]_0 I_0(v_1) \Delta K_{\text{III}} + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial d} \right]_0 I_0(v_1) \Delta d + \\
& + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial T_c} \right]_0 I_0(v_1) \Delta T_c + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial p_{\text{в.п. (max)}}} \right]_0 I_0(v_1) \Delta p_{\text{в.п. (max)}} + \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1) \partial \rho_{\text{в.п. (c)}}} \right]_0 I_0(v_1) \Delta \rho_{\text{в.п. (c)}} + \\
& + \left[ \frac{\partial \phi}{\partial I_0(v_2)} \right]_0 \Delta I_0(v_2) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_2)} \right]_0 \Delta I_0(v_2)^2 + \left[ \frac{\partial \phi}{\partial T} \right]_0 \Delta T + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial T} \right]_0 \Delta T^2 + \dots
\end{aligned}$$

Проаналізувавши розклад в ряд Тейлора, основні складові ряду та впливні величини наведемо нижче:  $\phi_0$  — вільний член розкладу;

$$\text{— чутливість} \quad S_0 = \left[ \frac{\partial \phi}{\partial I_0(v_1)} \right]_0 = \frac{\mu_{\text{в.п.}} p_c T Z K_{(v_2)}^{c.g.}}{I_0(v_1) d K_1 T_c p_{\text{в.п. (max)}} (K_{(v_1)}^{c.g.} K_{(v_2)}^{b.p.} - K_{(v_1)}^{b.p.} K_{(v_2)}^{c.g.})};$$

$$\text{— коефіцієнт впливу світлового потоку випромінювача по опорному каналу на вихідний параметр} \quad \beta'_{0I_0(v_2)} = \left[ \frac{\partial \phi}{\partial I_0(v_2)} \right]_0 = \frac{\mu_{\text{в.п.}} p_c T Z K_{(v_1)}^{c.g.}}{I_0(v_2) d K_3 T_c p_{\text{в.п. (max)}} \rho_{\text{в.п. (c)}} (K_{(v_1)}^{c.g.} K_{(v_2)}^{b.p.} - K_{(v_1)}^{b.p.} K_{(v_2)}^{c.g.})};$$

$$\begin{aligned}
& \text{— коефіцієнт впливу температури газу на вихідний параметр} \\
\beta'_{0T} &= \left[ \frac{\partial \phi}{\partial T} \right]_0 = \frac{\mu_{\text{в.п.}} p_c Z \left( K_{(v_2)}^{c.g.} K_3 \left( \ln \frac{I_0(v_1) \tau_0 S K_{\text{III}}}{K_2} - \frac{U(v_1)}{K_1} \right) - K_{(v_1)}^{c.g.} K_1 \left( \ln \frac{I_0(v_2) \tau_0 S K_{\text{III}}}{K_4} - \frac{U(v_2)}{K_3} \right) \right)}{d K_1 K_3 T_c p_{\text{в.п. (max)}} (K_{(v_1)}^{c.g.} K_{(v_2)}^{b.p.} - K_{(v_1)}^{b.p.} K_{(v_2)}^{c.g.}) \rho_{\text{в.п. (c)}}};
\end{aligned}$$

— коефіцієнт впливу питомого молярного показника поглинання природного сухого газу на частоті  $\nu_1$  на вихідний параметр

$$\beta'_{0K_{(v_1)}^{c.g.}} = \left[ \frac{\partial \phi}{\partial K_{(v_1)}^{c.g.}} \right]_0 = - \frac{\mu_{\text{в.п.}} p_c T Z \left( \ln \frac{I_0(v_2) \tau_0 S K_{\text{III}}}{K_2} - \frac{U(v_2)}{K_3} \right)}{d K_3 T_c p_{\text{в.п. (max)}} (K_{(v_1)}^{c.g.} K_{(v_2)}^{b.p.} - K_{(v_1)}^{b.p.} K_{(v_2)}^{c.g.}) \rho_{\text{в.п. (c)}}} -$$

$$- \frac{\mu_{\text{в.п.}} p_c T Z K_{(v_2)}^{b.p.} \left( K_{(v_2)}^{c.g.} K_3 \left( \ln \frac{I_0(v_1) \tau_0 S K_{\text{III}}}{K_2} - \frac{U(v_1)}{K_1} \right) - K_{(v_1)}^{c.g.} K_1 \left( \ln \frac{I_0(v_2) \tau_0 S K_{\text{III}}}{K_4} - \frac{U(v_2)}{K_3} \right) \right)}{d K_1 K_3 T_c p_{\text{в.п. (max)}} (K_{(v_1)}^{c.g.} K_{(v_2)}^{b.p.} - K_{(v_1)}^{b.p.} K_{(v_2)}^{c.g.})^2 \rho_{\text{в.п. (c)}}};$$

— коефіцієнт впливу питомого молярного показника поглинання природного сухого газу на частоті  $\nu_2$  на вихідний параметр

$$\beta'_{0K_{(v_2)}^{c.g.}} = \left[ \frac{\partial \phi}{\partial K_{(v_2)}^{c.g.}} \right]_0 = \frac{\mu_{\text{в.п.}} p_c T Z \left( \ln \frac{I_0(v_1) \tau_0 S K_{\text{III}}}{K_2} - \frac{U(v_1)}{K_1} \right)}{d K_1 T_c p_{\text{в.п. (max)}} (K_{(v_1)}^{c.g.} K_{(v_2)}^{b.p.} - K_{(v_1)}^{b.p.} K_{(v_2)}^{c.g.}) \rho_{\text{в.п. (c)}}} +$$

$$+ \frac{\mu_{\text{в.п.}} p_c T Z K_{(v_1)}^{b.p.} \left( K_{(v_2)}^{c.g.} K_3 \left( \ln \frac{I_0(v_1) \tau_0 S K_{\text{III}}}{K_2} - \frac{U(v_1)}{K_1} \right) - K_{(v_1)}^{c.g.} K_1 \left( \ln \frac{I_0(v_2) \tau_0 S K_{\text{III}}}{K_4} - \frac{U(v_2)}{K_3} \right) \right)}{d K_1 K_3 T_c p_{\text{в.п. (max)}} (K_{(v_1)}^{c.g.} K_{(v_2)}^{b.p.} - K_{(v_1)}^{b.p.} K_{(v_2)}^{c.g.})^2 \rho_{\text{в.п. (c)}}};$$

— коефіцієнт впливу питомого молярного показника поглинання водяної пари на частоті  $\nu_1$  на вихідний параметр

$$\beta'_{0K(v_1)^{B.P.}} = \left[ \frac{\partial \phi}{\partial K(v_1)^{B.P.}} \right]_0 =$$

$$= \frac{\mu_{B.P.} p_c T Z K_{(v_2)}^{C.G.} \left( K_{(v_2)}^{C.G.} K_3 \left( \ln \frac{I_0(v_1) \tau_0 S K_{III}}{K_2} - \frac{U(v_1)}{K_1} \right) - K_{(v_1)}^{C.G.} K_1 \left( \ln \frac{I_0(v_2) \tau_0 S K_{III}}{K_4} - \frac{U(v_2)}{K_3} \right) \right)}{dK_1 K_3 T_c p_{B.P.(\max)} \left( K_{(v_1)}^{C.G.} K_{(v_2)}^{B.P.} - K_{(v_1)}^{B.P.} K_{(v_2)}^{C.G.} \right)^2 \rho_{B.P.(c)}};$$

— коефіцієнт впливу питомого молярного показника поглинання водяної пари на частоті  $v_2$  на вихідний параметр

$$\beta'_{0K(v_2)^{B.P.}} = \left[ \frac{\partial \phi}{\partial K(v_2)^{B.P.}} \right]_0 =$$

$$= \frac{\mu_{B.P.} p_c T Z K_{(v_1)}^{C.G.} \left( K_{(v_2)}^{C.G.} K_3 \left( \ln \frac{I_0(v_1) \tau_0 S K_{III}}{K_2} - \frac{U(v_1)}{K_1} \right) - K_{(v_1)}^{C.G.} K_1 \left( \ln \frac{I_0(v_2) \tau_0 S K_{III}}{K_4} - \frac{U(v_2)}{K_3} \right) \right)}{dK_1 K_3 T_c p_{B.P.(\max)} \left( K_{(v_1)}^{C.G.} K_{(v_2)}^{B.P.} - K_{(v_1)}^{B.P.} K_{(v_2)}^{C.G.} \right)^2 \rho_{B.P.(c)}};$$

— мультиплікативна похибка перетворення в умовах зміни коефіцієнта функціонального перетворювача вимірювального каналу  $K_1$

$$\Delta \phi_{MK_1} = \alpha_{0K_1} I_0(v_1) \Delta K_1 = - \frac{\mu_{B.P.} p_c T Z K_{(v_1)}^{C.G.} dK_1}{dK_1^2 T_c p_{B.P.(\max)} \left( K_{(v_1)}^{C.G.} K_{(v_2)}^{B.P.} - K_{(v_1)}^{B.P.} K_{(v_2)}^{C.G.} \right) \rho_{B.P.(c)}};$$

— мультиплікативна похибка перетворення в умовах зміни густини водяної пари

$$\Delta \phi_{MP} = \alpha_{0\rho} I_0(v_1) \Delta \rho_{B.P.(c)} = - \frac{\mu_{B.P.} p_c T Z K_{(v_2)}^{C.G.} d\rho_{B.P.(c)}}{dK_1 T_c p_{B.P.(\max)} \left( K_{(v_1)}^{C.G.} K_{(v_2)}^{B.P.} - K_{(v_1)}^{B.P.} K_{(v_2)}^{C.G.} \right) \rho_{B.P.(c)}^2};$$

— адитивна похибка перетворення в умовах зміни впливу світлового потоку випромінювача по опорному каналу

$$\Delta \phi_{aI_0(v_2)} = \beta'_{0I_0(v_2)} \Delta I_0(v_2) + \beta''_{0I_0(v_2)} \Delta I_0(v_2)^2 = \frac{\mu_{B.P.} p_c T Z K_{(v_1)}^{C.G.} dI_0(v_2)}{I_0(v_2) dK_3 T_c p_{B.P.(\max)} \left( K_{(v_1)}^{C.G.} K_{(v_2)}^{B.P.} - K_{(v_1)}^{B.P.} K_{(v_2)}^{C.G.} \right) \rho_{B.P.(c)}} +$$

$$+ \frac{\frac{1}{2} \mu_{B.P.} p_c T Z K_{(v_1)}^{C.G.} dI_0^2(v_2)}{I_0^2(v_2) dK_3 T_c p_{B.P.(\max)} \left( K_{(v_1)}^{C.G.} K_{(v_2)}^{B.P.} - K_{(v_1)}^{B.P.} K_{(v_2)}^{C.G.} \right) \rho_{B.P.(c)}};$$

— абсолютна похибка нелінійності номінальної функції перетворення

$$\Delta \sigma_n = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 \phi}{\partial I_0(v_1)^2} \right]_0 I_0(v_1)^2 + \frac{1}{6} \left[ \frac{\partial^3 \phi}{\partial I_0(v_1)^3} \right]_0 I_0(v_1)^3 =$$

$$= - \frac{1}{6} \frac{\mu_{B.P.} p_c T Z K_{(v_2)}^{C.G.}}{dK_1 T_c p_{B.P.(\max)} \left( K_{(v_1)}^{C.G.} K_{(v_2)}^{B.P.} - K_{(v_1)}^{B.P.} K_{(v_2)}^{C.G.} \right) \rho_{B.P.(c)}}.$$

На рис. 4—11 наведені результати моделювання мультиплікативних, адитивних похибок та абсолютної похибки нелінійності перетворення в умовах зміни впливу світлового потоку випромінювача по вимірювальному каналу, температури, коефіцієнта перетворення вимірювального каналу, товщини шару газу, питомих молярних показників поглинання природного сухого газу та водяної пари.

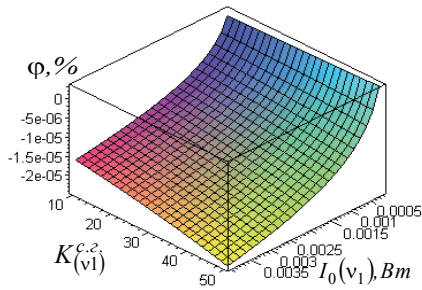


Рис. 4. Адитивна похибка перетворення за умови зміни питомого молярного показника поглинання природного сухого газу на частоті  $\nu_1$   $\phi_a(I_0(\nu_1), K_{(v_1)}^{c.r.})$

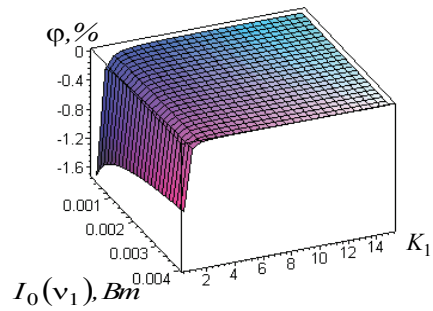


Рис. 5. Адитивна похибка перетворення за умови зміни коефіцієнта перетворення вимірювального каналу  $\phi_a(I_0(\nu_1), K_1)$

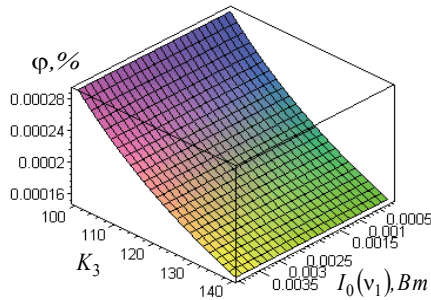


Рис. 6. Адитивна похибка перетворення за умови зміни коефіцієнта перетворення опорного каналу  $\phi_a(I_0(\nu_1), K_3)$

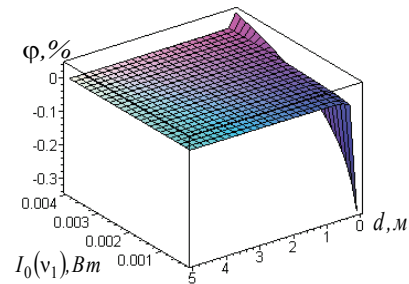


Рис. 7. Адитивна похибка перетворення за умови зміни товщини шару газу  $\phi_a(I_0(\nu_1), d)$

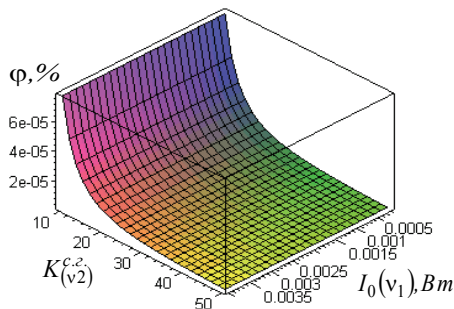


Рис. 8. Мультиплікативна похибка перетворення за умови зміни питомого молярного показника поглинання природного сухого газу на частоті  $\nu_2$   $\phi_m(I_0(\nu_1), K_{(v_2)}^{c.r.})$

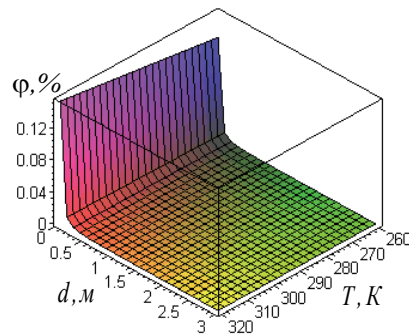


Рис. 9. Мультиплікативна похибка перетворення за умови зміни товщини шару газу та температури  $\phi_m(T, d)$

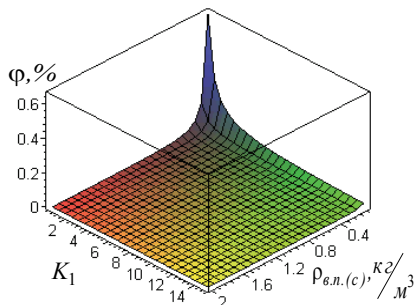


Рис. 10. Мультиплікативна похибка перетворення за умови зміни коефіцієнта перетворення вимірювального каналу та густини  $\phi_m(K_1, \rho_{v.p.(c)})$

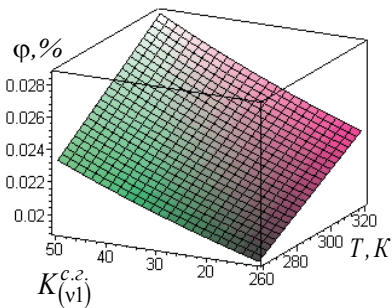


Рис. 11. Абсолютна похибка нелінійності номінальної функції перетворення за умови зміни питомого молярного показника поглинання природного сухого газу на частоті  $\nu_1$  та температури  $\phi_{a.n.}(K_{(v_1)}^{c.r.}, T)$

З наведених залежностей видно, що адитивна та мультиплікативна похибки перетворення зростають якщо коефіцієнт перетворення вимірювального каналу більше 2. Якщо товщина шару газу, через який проходить потік світла, менший за 1 м, то зростає мультиплікативна та адитивна похибки. Похибки таких величин, як питомий молярний показник поглинання природного сухого газу на частотах  $\nu_1$  та  $\nu_2$ , температура, густина водяної пари, коефіцієнт перетворення опорного каналу, менші за величину чутливості визначення відносної вологості, тому ними можна знехтувати. Абсолютна похибка нелінійності номінальної функції перетворення зростає зі зменшенням температури та збільшенням питомого молярного показника поглинання природного сухого газу на частоті  $\nu_1$ , аналогічна картина спостерігається і для частоти  $\nu_2$ .

### Висновки

1. Запропоновано інфрачервоний аналізатор вологості газу та проведено дослідження, які показали, що наявність опорного каналу дозволило підвищити точність вимірювання, оскільки двоканальна система, на відміну від одноканальної, не вимагає додаткових вимірювань тиску газу та його молекулярної маси. Крім цього, використання додаткового каналу дозволяє виключити вплив агресивних домішок.

2. Запропоновано функцію перетворення двоканального аналізатора вологості газу з оберненим зв'язком та побудовано теоретичну залежність вологості природного газу від світлового потоку, що проходить через газове середовище.

3. Отримано аналітичні залежності для оцінки основних статичних метрологічних характеристик аналізатора вологості газу. Оцінено функції чутливості впливних величин на результати вимірювання вологості газу. Розраховано значення адитивної, мультиплікативної похибок та похибки нелінійності.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. 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-техн. сб. — 2005. — № 2. — С. 10—22.
3. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 96 с.
4. ГОСТ 20060-83. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги.
5. Вимірювання витрат та кількості газу : довідник / [М. П. Андрієшин, С. О. Канєвський, О. М. Карпаш та ін.]. — Івано-Франківськ : ПП «Сімик», 2004. — 160 с.
6. Білинський Й. Й. Модель перенесення випромінювання в середовищі вологого газу та визначення його відносної вологості / Й. Й. Білинський, В. В. Онушко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2010. — № 5. — С. 18—22.
7. Білинський Й. Й. Математична модель аналізатора вологості природного газу [Електронний ресурс] / Й. Й. Білинський, В. В. Онушко // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. — 2010. — № 4. — Режим доступу : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2010-4/uk.htm>.
8. Білинський Й. Й. Підвищення чутливості аналізатора вологості газу / Й. Й. Білинський, О. С. Городецька, В. В. Онушко // Методи та прилади контролю якості. — 2010. — № 25. — С. 51—54.
9. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы / П. П. Орнатский. — К. : Вища школа, 1980. — 560 с.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем і телебачення

Стаття надійшла до редакції 21.03.11

Рекомендована до друку 11.05.11

**Білинський Йосип Йосипович** — завідувач кафедри електроніки;

**Городецька Оксана Степанівна** — доцент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення.

**Книш Богдан Петрович** — студент Інституту магістратури, аспірантури та докторантури.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Онушко Василь Володимирович** — заступник начальника відділу ДП «Укрметртестстандарт», Київ