

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.311.25

Й. Й. Білинський, д-р техн. наук, проф.;

О. С. Городецька, канд. техн. наук, доц.;

Б. П. Книш, асп.;

В. В. Онушко

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АНАЛІЗАТОРА ВОЛОГОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

*Запропоновано двоканальний аналізатор вологості природного газу, наведено функцію перетворення, розроблено експериментальну установку аналізатора та методику проведення досліджень. Проведено експериментальні дослідження, отримано основні статичні характеристики результатів вимірювання, закони розподілу контрольованої величини та відносної похибки вимірювання.*

### Вступ

Задача вимірювання вологості — одна з найважливіших проблем як для чистих, так і для технологічних газів. З розвитком технологій газопереробки, газорозділення та нафтохімії для забезпечення якості продукції, коли необхідно перейти до гранично низьких концентрацій, і виникає необхідність в швидкому відгуку аналізатора, в тому числі і для газів змінного складу, задача вимірювання вологості відразу ускладнюється. Особливі труднощі виникають, де необхідне неперервне визначення вологості: на потоці, в реальних технологічних газах нафтохімії та газопереробки.

Аналіз науково-технічної літератури [1, 2] показує, що на сьогоднішній день найбільше застосування знаходять такі види датчиків вологості газів: ємнісні (вимірювання вологості за діелектричною проникністю газового середовища), електропровідні (резистивні, в яких використовується залежність опору неметалевих провідників від вмісту в них води, та термисторні, в яких вимірювання вологості здійснюється за зміною теплопровідності газів), датчики температури точки роси (рідка та газова фази води знаходяться в рівновазі). В останній час частіше використовуються аналізатори на основі спектрометрів, більшість яких працює в інфрачервоній області. Особливість інфрачервоного спектра полягає в тому, що поглинання випромінювання залежить не тільки від всієї молекули в цілому, але й від наявності в ній певних груп атомів, навіть окремих зв'язків між атомами [3].

Згідно з Правилами вимірювання витрат газів і рідин РД 50-213-80 значення відносної вологості за нормальних умов має бути меншим 0,1, що відповідає температурі точки роси  $-58,530$  °С. Тому експериментальні дослідження будуть проводитись за цього значення температури точки роси [4].

*Метою роботи є розробка експериментальної установки аналізатора вологості газу та проведення експериментальних досліджень.*

### Матеріали та результати досліджень

В роботі запропоновано аналізатор вологості природного газу зі зворотним зв'язком, структурна схема якого показана на рис. 1. Аналізатор складається з опорного і вимірювального каналів [5]. Світловий потік, що випромінюється лазерним світлодіодом, проходить через вимірювальне середовище, перетворюється в електричний сигнал на виході фотоприймача, підсилюється та подається на генератор, на виході якого формується частотно-імпульсний сигнал, частота якого змінюється в залежності від величини електричного сигналу. Частотно-імпульсний сигнал підсилюється підсилювачем потужності в струмовий електричний сигнал і надходить на лазерний світлодіод. Вимі-

рювальний і опорний канал охоплені глибоким від'ємним зворотним зв'язком, тому світловий потік, що потрапляє на фотоприймач, залишається постійним. При цьому електричний сигнал з підсилювача потужності потрапляє на мікропроцесор і порівнюється з електричним сигналом від підсилювача потужності вимірювального каналу. Отриманий від порівняння сигнал обробляється за алгоритмом на основі математичної моделі [6] і результат обробки у вигляді значень відносної вологості видається на індикаторний пристрій.

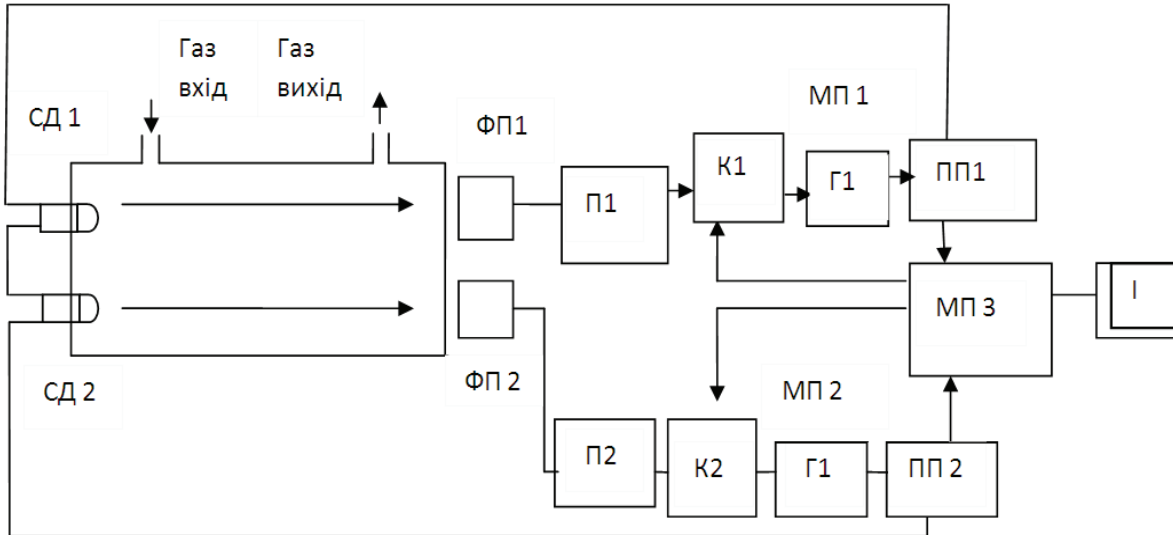


Рис. 1. Структурна схема аналізатора вологості природного газу:

СД1, СД2 — лазерні світлодіоди, налаштовані на вимірювану і опорну довжини хвилі;  
 ФП1, ФП2 — фотоприймачі; П1, П2 — попередні підсилювачі вимірювального і опорного каналів;  
 К1, К2 — комутатори вимірювального і опорного каналів; Г1, Г2 — керовані генератори вимірювального і опорного каналів; ПП1, ПП2 — підсилювачі потужності вимірювального і опорного каналів;  
 МП — мікропроцесор; І — індикаторний пристрій

Відносна вологість природного газу визначається за формулою [6]

$$\phi = \frac{\mu_{\text{в.п.}} p_c T Z \left( K_{(v_2)}^{\text{с.г.}} K_3 \left( \ln \frac{I_0(v_1) \tau_0 S K_{\text{ПП}}}{K_2} - \frac{U(v_1)}{K_1} \right) - K_{(v_1)}^{\text{с.г.}} K_1 \left( \ln \frac{I_0(v_2) \tau_0 S K_{\text{ПП}}}{K_4} - \frac{U(v_2)}{K_3} \right) \right)}{d K_1 K_3 T_c p_{\text{в.п.}}(\text{max}) \left( K_{(v_1)}^{\text{с.г.}} K_{(v_2)}^{\text{в.п.}} - K_{(v_1)}^{\text{в.п.}} K_{(v_2)}^{\text{с.г.}} \right) \rho_{\text{в.п.}}(\text{с})}, \quad (1)$$

де  $\mu_{\text{в.п.}}$  — молекулярна маса водяної пари;  $p_c$ ,  $T_c$  — 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, які є аналогічні коефіцієнтам  $K_1$ ,  $K_3$ , де  $K_2 = \frac{K_1}{e}$ ,  $K_4 = \frac{K_3}{e}$ ;  $\tau_0$  — коефіцієнт пропускання оптичної системи;  $S$  — інтегральна чутливість фотоприймального пристрою;  $K_{\text{ПП}}$  — коефіцієнт передачі попереднього підсилювача;  $U(v_1)$ ,  $U(v_2)$  — вихідна напруга аналізатора на частоті  $v$ , відповідно;  $p_{\text{в.п.}}(\text{max})$  — максимальний тиск водяної пари;  $K_{(v_1)}^{\text{с.г.}}$  і  $K_{(v_1)}^{\text{в.п.}}$ ,  $K_{(v_2)}^{\text{с.г.}}$  і  $K_{(v_2)}^{\text{в.п.}}$  — питомі молярні показники поглинання природного сухого газу та водяної пари вимірювального та опорного каналів;  $I_0(v_1)$ ,  $I_0(v_2)$  — світловий потік випромінювача на частотах  $v_1$ ,  $v_2$ , відповідно;  $d$  — товщина шару газу, через який проходить пучок інтенсивності світла  $I_0$ ;  $\rho_{\text{в.п.}}(\text{с})$  — густина водяної пари за стандартних умов.

Формула перетворення (1) дозволяє визначити відносну вологість газу, не враховуючи ні густину суміші газів, ні його молекулярну масу, ані тиск, що істотно спрощує процес вимірювання.

Для проведення експериментальних досліджень розроблена експериментальна установка аналізатора вологості природного газу (АВПГ), наведена на рис. 2. На початку досліджень необхідно

провести налаштування та з'єднання засобів, які забезпечують експеримент. Для цього розроблено методику проведення досліджень газового аналізатора, яка передбачає такі заходи:

1. Заземлити вторинний блок та під'єднати до аналізатора;
2. Під'єднати газовий вхід аналізатора до входу калібрувальної системи;
3. Під'єднати газовий вихід аналізатора через ротаметр і барометр до спускного клапана;
4. Підготувати калібрувальну систему до роботи;
5. В момент подачі газу в аналізатор записати покази термометра, барометра і ротаметра;
6. Виконати записи показів прецизійного вимірювача точки роси;
7. Паралельно з показами вимірювача точки роси проводити запис значень вторинного перетворювача аналізатора газу, який налаштований на розбалансовану напругу зворотного зв'язку аналізатора.

Експериментальні дослідження АВПГ-1 проводилися за температури  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тиску — одна атмосфера та швидкості потоку газу —  $10\text{ л/хв}$ . Розхід газу складав  $2\text{ дм}^3/\text{хв}$ . Отримані значення вологості за точкою роси за допомогою калькулятора Free Professional Online Humidity Calculator перераховувалися в абсолютну вологість, відносну вологість і в одиниці вологості ppm.

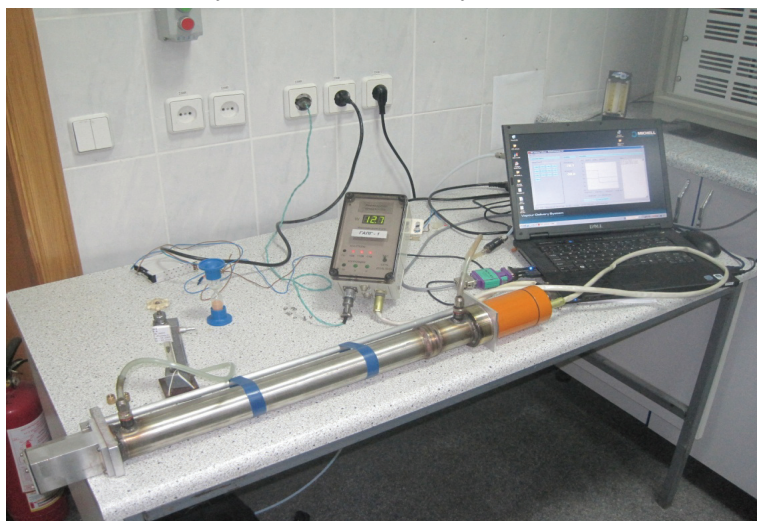


Рис. 2. Зовнішній вигляд вимірювача АВПГ-1 та керуючого ПК і система з'єднань

Під час проведення експериментальних досліджень похибок вимірювання вологості отримано 400 значень у діапазоні від  $-76,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  температури точки роси (т. т. р.). Вимірювання проводилися за т. т. р., що відповідає  $-58,21\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $-71,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , відповідно. Значення вологості газу задавалося калібрувальною системою Michell Dew Point Calibration System. Вимірювання дійсного значення вологості проводилося за допомогою прецизійного вимірювача точки роси Michell S4000TRS (Великобританія). Теоретична та експериментальна статичні характеристики показані на рис. 3.

Результати експериментальних досліджень вимірювання вологості показані на рис. 4.

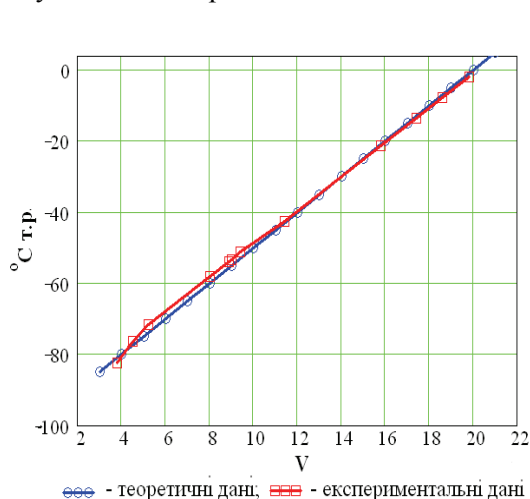


Рис. 3. Теоретична та експериментальна статичні характеристики

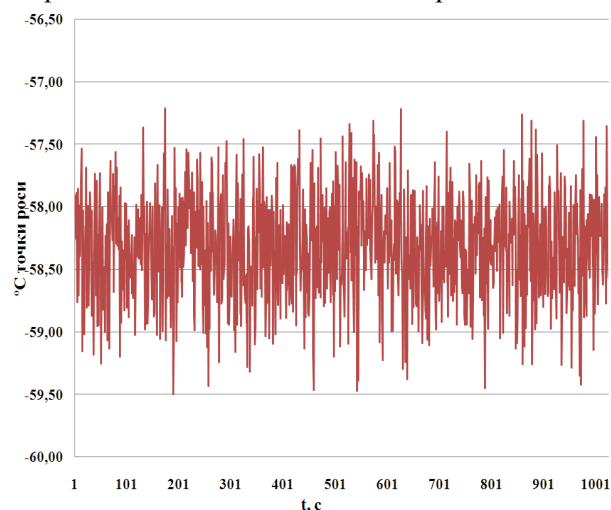


Рис. 4. Зміна вологості газу в часі

Аналіз експериментальних досліджень вологості показує, що максимальне значення зведеної похибки вимірювання не перевищує 2,3 %, клас точності складає 2,5. Основні статистичні характеристики для отриманих результатів вимірювання наведені в таблиці.

## Статичні характеристики похибки вимірювання вологості

Найменування характеристики	Температура точки роси	
	-58,21 °C (φ, % = 0,081)	-71,6 °C (φ, % = 0,015)
Кількість значень	1024	1024
Характеристики температури точки роси, °C		
мінімальне значення	-59,40	-72,99
максимальне значення	-57,21	-70,58
середнє арифметичне значення	-58,32	-71,73
середньоквадратичне відхилення	0,42	0,38
абсолютна похибка	-1,19	-1,36
довірчий інтервал	-58,35 -58,29	-71,75 -71,70
Chi <sup>2</sup> -тест	S = 19,9839	S = 14,196

Статистичні оцінки для експериментальних даних та перевірка гіпотези на нормальний закон розподілу проводилися за допомогою програми Numeri v. 2.1.

На основі експериментальних досліджень побудовано закон розподілу контрольованої величини (рис. 5), відносної похибки вимірювання вологості (рис. 6) та сумісний закон розподілу (рис. 7). Закони розподілу отримано на основі серії з 1024 вимірювань.

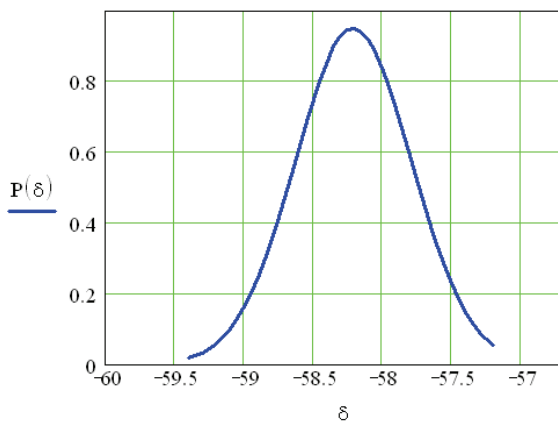


Рис. 5. Закон розподілу контрольованої величини

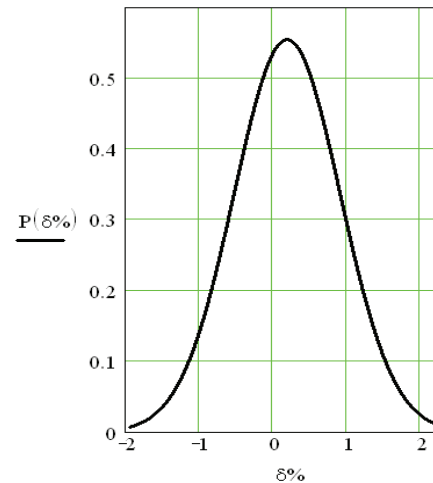


Рис. 6. Закон розподілу відносної похибки вимірювання відносної вологості

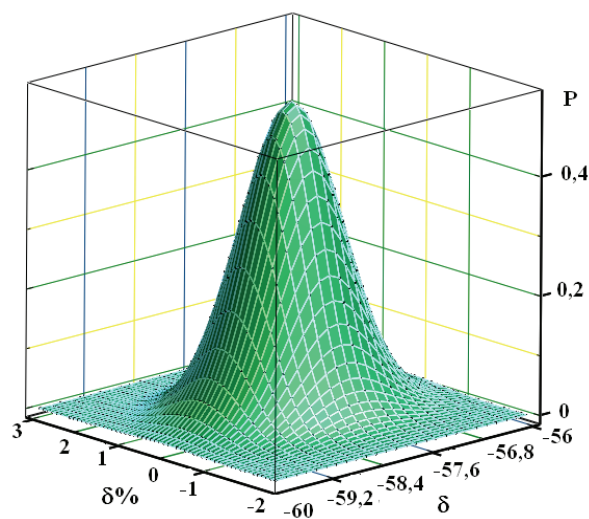


Рис. 7. Сумісний закон розподілу

Аналіз експериментально отриманих законів розподілу (див. рис. 5—7) показує, що в отриманих результатах має місце систематична складова похибка, тому закони є несиметричними.

За результатами експериментальних досліджень обчислена вірогідність контролю для нульового математичного очікування похибки вимірювання: помилка першого роду становить 0,02696, помилка другого роду — 0,00273. Загальна ймовірність прийняття правильного рішення становить 0,9703.

### Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки.

1. Запропоновано аналізатор вологості природного газу та проведено дослідження, які показали, що наявність опорного каналу дозволила 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 методику експериментальних досліджень розробленого аналізатора. Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що застосування двохвилевої схеми сенсора забезпечує відсутність інерційності й дозволяє застосовувати розроблений засіб контролю газу в потоці та здійснювати безперервний контроль стану обладнання в умовах експлуатації.

3. За результатами вимірювань вологості оцінено основні статистичні характеристики (СКВ = 0,4229 °C) та побудовані закони розподілу контрольованої величини. Побудовано експериментальну статичну характеристику. Встановлено, що відносна похибка вимірювань вологості не перевищує 2,5 %, помилка першого роду становить 0,02696, а помилка другого роду — 0,00273. Загальна ймовірність прийняття правильного рішення становить 0,9703.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э. С. Мусаев. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 96 с.
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. Зайнутдинов Р. А. Разработка оптического устройства для оперативного и точного контроля влажности газа / Р. А. Зайнутдинов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2010. — № 3(11). — С. 14—18.
4. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги : ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 (ИСО 5167-1:2003). — [Чинний від 2010-04-01]. — К. : Держспоживстандарт України, 2010. = 175 с. — (Національні стандарти України).
5. Двоканальний аналізатор вологості газу та дослідження його статичних метрологічних характеристик / [Й. Й. Білинський, О. С. Городецька, В. В. Онушко, Б. П. Книш] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 3. — С. 222—228.
6. Білинський Й. Й. Математична модель аналізатора вологості природного газу [Електронний ресурс] / Й. Й. Білинський, В. В. Онушко // Наукові праці ВНТУ. — 2010. — № 4. — Режим доступу до журн. : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2010-4/uk.htm>.
7. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навч. посіб. / [С. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк]. — Вінниця : Велес, 2001. — 219 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Стаття надійшла до редакції 13.11.12

Рекомендована до друку 21.11.12

**Білинський Йосип Йосипович** — завідувач кафедри, **Книш Богдан Петрович** — аспірант.

Кафедра електроніки;

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

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Онушко Василь Володимирович** — начальник відділу ДП «Укрметртестстандарт», Вінниця