

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 543.275.1.08

Й. Й. Білинський, д-р техн. наук, проф.; К. Ю. Іоніна, асп.

## СВІТЛОВИДНИЙ ВИМІРЮВАЧ ВОЛОГОСТІ ГАЗУ

*Розроблено математичну модель і створено діючий макет світловидного вимірювального перетворювача на основі конденсаційного методу, який забезпечує підвищення точності вимірювання вологості, запропоновано його конструкцію.*

### Вступ

Існує ціла низка завдань, пов'язаних з вимірюванням вологості газів та їх сумішей, зокрема повітря. Вологість газів вимірюють в промисловості, техніці, медицині, метеорології, в процесах видобування та транспортування газів тощо. Задачі вимірювання вологості газу можна розділити на три великі групи в залежності від процесів газової промисловості, а саме: вимірювання вологості в процесах сушіння газу на родовищах та газопереробних заводах; під час транспортування газу та його комерційного обліку. Відсутність засобів вимірювання вологості газів, які дозволяють з високою точністю визначати відносну вологість, призводить до значних економічних збитків. Тому очевидною стає потреба підвищення точності вимірювання вологості газів. Серед відомих методів вимірювання вологості газів одним з високоточних вважається конденсаційний метод на основі температури точки роси. Однак цей метод також має недоліки, зокрема, залежність показів сенсора від моменту фіксації температури початку конденсації вологи, оскільки для утворення видимої плівки конденсату на дзеркалі може знадобитися від декількох хвилин до годин, а також можлива деяка неоднозначність вимірювань через близькість температур конденсації вологи та інших складових газу [1, 2].

*Метою роботи є розробка світловидного вимірювача вологості газу на основі конденсаційного методу, який забезпечує підвищення точності вимірювання вологості.*

### Основна частина

Відомо, що класична схема вимірювача вологості на основі конденсаційного методу містить конденсаційну поверхню, яку ще називають дзеркалом, та оптичну схему. Однак такий вимірювач завдяки одному зовнішньому відбиттю не забезпечує високу точність, оскільки отримання відбитого променя лише в одній точці вимагає додаткових апаратних затрат, а зміна інтенсивності залежить від швидкості випадання роси. Крім того, ймовірно, що на дзеркалі може сконденсуватися не тільки вода, а одна чи навіть декілька домішок аналізованого газу з різними показниками заломлення (наприклад, вода — 1,333; азот — 1,197; етан — 1,37; декан — 1,4119; бутан — 1,3326). Тому варто провести перевірку того, яка саме речовина сконденсувалася, тобто забезпечити вибірковість вимірювань. Використання зовнішнього багаторазового відбиття дозволило підвищити швидкість зміни вихідної інтенсивності, а отже й точність, але в такому випадку відбиття відбувалося б в різних місцях, що є суттєвим недоліком такої структури. Тому ефективним може бути використання внутрішнього багаторазового відбиття, що досягається за допомогою світловода [1–3].

В роботі запропоновано світловидний вимірювач вологості газу на основі багаторазового внутрішнього відбиття, що забезпечує підвищення точності вимірювального перетворення. Для отримання повного внутрішнього відбиття в світловоді використано вузький гомоцентричний пучок, кут введення якого лежить в межах критичного кута для води з метою досягнення вибірковості вимірювань. Реєстрація температури точки роси відбувається в момент

отримання значення межі світлотіні, що відповідає показнику заломлення води. Для цього використано фотоприймач типу фотолінійки. Отримане значення температури точки роси переводиться у значення відносної вологості [1, 3, 4].

На основі розробленої математичної моделі в [5] струм на виході фотоприймача з урахуванням його номера комірки визначається так:

$$I_{fp}(n_I, \Theta, P_{vix}) = \frac{2S_{fp}S_{pr}T_k}{\pi D^2} \exp(-\chi L_n) \left[ \frac{n_0 \cos(\phi + \beta_N) - \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\phi + \beta_N)}}{n_0 \cos(\phi + \beta_N) + \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\phi + \beta_N)}} \right]^{2k} + \left[ \frac{n_1^2 \cos(\phi + \beta_N) - n_0 \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\phi + \beta_N)}}{n_1^2 \cos(\phi + \beta_N) + n_0 \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2(\phi + \beta_N)}} \right]^{2k} \int_0^{T_n} F_{pr}(t) dt, \quad (1)$$

де  $\beta_N = \arctg \frac{(N-1)(l+P)+1/2}{r}$  – кут між початком фотоприймача (фотолінійки) і центром

$N$ -го елемента;  $l$  – протяжність чутливої ділянки фотоприймача;  $P$  – зазор між чутливими елементами;  $r$  – протяжність нормалі від точки першого відбиття до фотолінійки;  $T_k$  – температурний коефіцієнт;  $P_{vix}$  – вихідна потужність;  $\Theta$  – критичний кут;  $n_0$  і  $n_1$  – показники заломлення скла світловода та конденсату відповідно;  $\phi$  – кут між нормаллю до поверхні розділу в точці відбиття та перпендикуляром до площини розділу світловод-плівка конденсату;  $k$  – кількість відбиттів;  $S_{fp}$  – інтегральна чутливість фотоприймача;  $S_{pr}$  – площа фоточутливого елемента;  $F_{pr} = FR\tau_c$ ;  $R$  – коефіцієнт відбиття;  $\tau_c$  – коефіцієнт пропускання середовища, в якому поширюється випромінювання, що визначається виразом:  $\tau_c = \exp(-\chi L_n)$ ; де  $\chi$  – коефіцієнт екстинкції;  $L_n$  – шлях променя в світловоді;  $T_n$  – час накопичення заряду [1–4].

При цьому номер фотокомірки визначається як

$$N = \left[ 0,5 + 0,5 \operatorname{sign}(I_{fp}^N - I_{nas}) \right] = \begin{cases} 1, & I_{fp} = I_N; \\ 0, & I_{fp}^N < I_N, \end{cases} \quad (2)$$

де  $I_{fp}^N$  – струм  $N$ -ї фотокомірки;  $I_{nas}$  – струм насичення.

Розрахунок температури точки роси за показами сенсора температури проводиться за формулою

$$Tp = \begin{cases} \sum_{i=1}^4 D_i (R_t/R_0 - 1)^i; & R_t/R_0 < 1 (Tp < 0^\circ C); \\ \frac{\sqrt{A^2 - 4B(1 - R_t/R_0)} - A}{2B}; & R_t/R_0 \geq 1 (Tp \geq 0^\circ C), \end{cases} \quad (3)$$

де  $R_t, R_0$  – опір за вимірюваної температури точки роси та номінальний опір при  $0^\circ C$ , відповідно;  $A, B, D_1, D_2, D_3, D_4$  – табличні сталі, які залежать від температурного коефіцієнта сенсора [2].

Таким чином, формули (1)– (3) дають змогу описати роботу вимірювального світловодного перетворювача точки роси газу. Зміна струму фотоприймача (1), що відповідає конденсації саме води за положенням світлотіні (2) згідно з номером фотокомірки, свідчить про необхідність зняття показів сенсора температури (3). Отримані дані температури, що відповідають точці роси, за допомогою таблиці співвідношення основних вологісних характеристик [1–4] переводяться у значення вологості вимірюваного газу, оскільки вологість газу є базовим показником газів, який наводиться у стандартах та комерційних угодах.

На основі математичної моделі було запропоновано світловодний вимірювач вологості га-

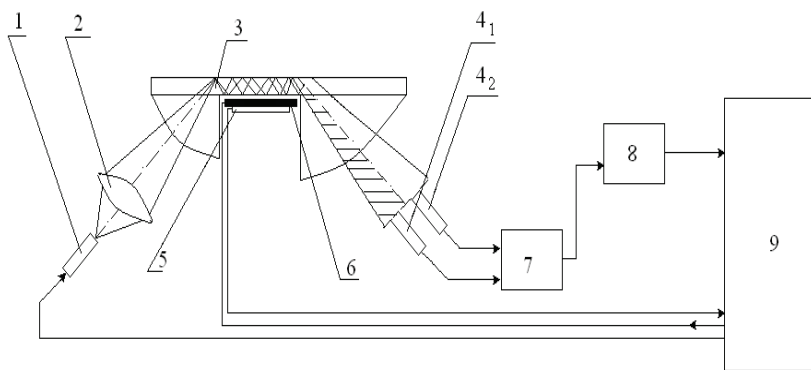


Рис. 1. Блок-схема світловодного вимірювача вологості газу

вмач вологості газу містить джерело світла 1, фокусує систему 2, світловод 3, виконаний у вигляді тонкої скляної пластинки з чутливою ділянкою та пристроями введення – виведення променів у вигляді двох півсфер з різними діаметрами, фотодетектор з двох фотодіодів  $4_1$  та  $4_2$ , вимірювач температури 5, термоелектрично регульований охолоджувач 6, аналоговий комутатор 7, аналого-цифровий перетворювач 8 та блок регулювання та обчислення 9.

Світловодний вимірювач вологості газу працює таким чином. Чутлива ділянка світловода 3 розміщується у безпосередньому контакті з аналізованим газом. Попередньо сфокусовані фокусує системою 2 промені світла від джерела світла 1, що розташоване під критичним кутом для води, згідно з командою блока регулювання та обчислення 9 через півсферу світловода вводяться в світловод 3, охолоджений термоелектрично регульованим охолоджувачем 6, де зазнають повного внутрішнього відбиття. Блок регулювання та обчислення 9 видає сигнал на термоелектрично регульований охолоджувач 6 на пониження температури та команду вимірювачу температури 5 зафіксувати температуру. Під час охолодження на чутливій ділянці світловода 3 починає випадати конденсат, за рахунок чого знижується інтенсивність відбитих променів світла. При досягненні точки роси на фотодетектор, виконаний у вигляді двох фотодіодів  $4_1$  та  $4_2$  потрапляє світлове поле, в зоні якого утворюється межа світлотіні. Фотодіоди  $4_1$  та  $4_2$  фотодетектора працюють в диференційному режимі. Для зчитування та оцифрування даних використовується аналого-цифровий перетворювач 8, на який надходить сигнал від аналогового комутатора 7. Пройшовши оцифрування в аналого-цифровому перетворювачі 8, сигнали подаються на блок регулювання та обчислення 9, який фіксує утворення межі світлотіні, віднімає та порівнює сигнали з максимально можливою різницею, що відповідає положенню межі світлотіні між фотодіодами. Це означає, що сконденсувалась саме водяна пара. У випадку, якщо різниця між сигналами максимальна, блок регулювання та обчислення 9 видає команду вимірювачу температури 5 зафіксувати температуру. Вологість газу визначається блоком регулювання та обчислення розрахунково за температурою точки роси.

Проведено експериментальні дослідження, які підтверджують попередні висновки щодо доцільності та точності запропонованої структури. Розроблений макет (рис. 2) складається із світлодіода 1, плоского світловода 2, фотоприймача 3, термоелектричного модуля Пельтьє 4, сенсора температури 5, радіатора 6 для відведення тепла з гарячої сторони термоелектричного модуля Пельтьє,

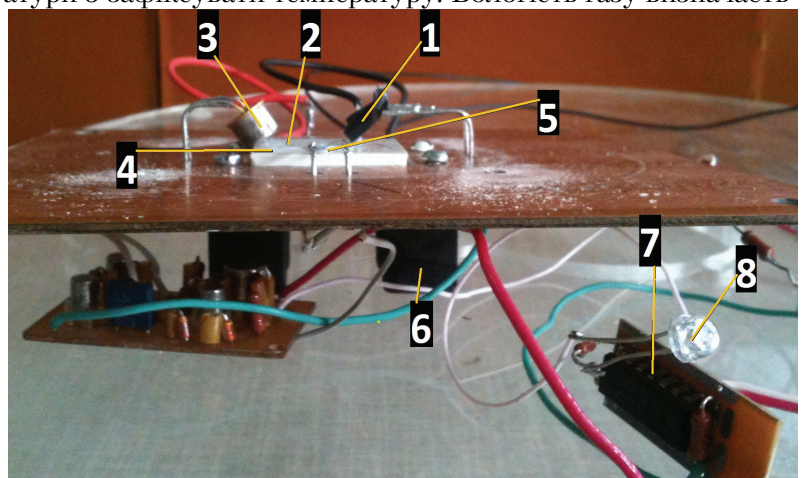


Рис. 2. Макет світловодного вимірювача вологості газів

АЦП 7, індикатора 8, а також омметра та відповідних джерел живлення.

На рис. 3 показано теоретичну та експериментальну характеристики світловодного вимірювача вологості газів.

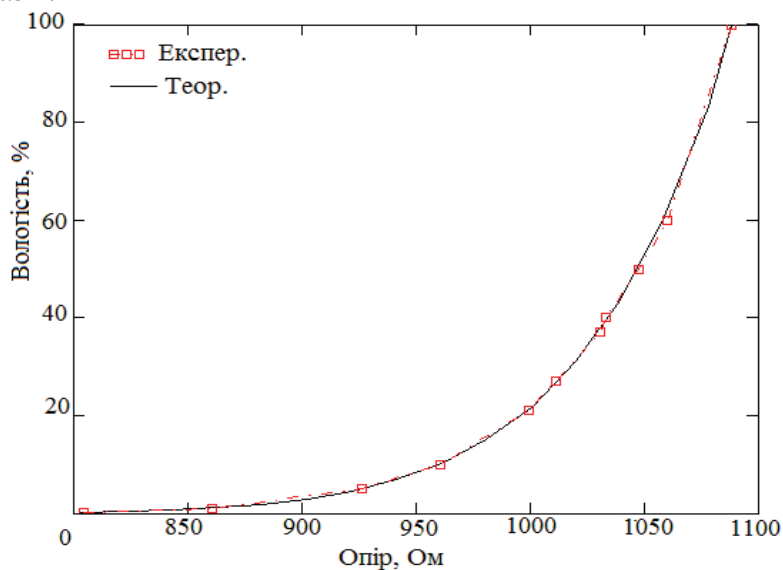


Рис. 3. Теоретична та експериментальна характеристики світловодного вимірювача вологості газів

З рис. 3 випливає, що математична модель адекватно описує процес вимірювання вологості газів світловодним вимірювачем.

### Висновки

Розроблено математичну модель і створено діючий макет світловодного вимірювального перетворювача на основі конденсаційного методу, який забезпечує підвищення точності вимірювання вологості, та запропоновано його конструкцію. Загальний аналіз отриманих розрахункових даних попередньо проведеного моделювання запропонованої структури підтвердив залежність просторового світлопропускання плоского світловода від показника заломлення зовнішнього середовища. Результати дослідження відкривають можливість вибору параметрів світловода та діапазону зміни показника заломлення для забезпечення максимальної чутливості й лінійності характеристики пристрою [3, 4]. Відхилення експериментальної кривої від теоретичної не перевищує 3 %. Діапазон вимірювання відносної вологості можна поділити на 2 піддіапазони: 0...10 % та 20...100 %; чутливість в межах піддіапазонів складає 0,063 %/Ом та 0,78 %/Ом відповідно, що дозволяє отримати високу точність вимірювань.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кучикян Л. М. Световоды / Л. М. Кучикян. — М. : Энергия, 1973. — 60 с.
2. Митчел Дж. Акватметрия / Дж. Митчел, Д. Смит. — М. : Химия, 1980. — 600 с.
3. Вейнберг В. Б. Оптика световодов / В. Б. Вейнберг, Д. К. Сагтаров. — изд. 2-е, перераб. и доп. — Л. : Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977. — 320 с.
4. Азимов Р. К. Оптоэлектронные преобразователи больших перемещений на основе полых световодов / Р. К. Азимов, Ю. Г. Шипулин. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 56 с.
5. Білінський Й. Й. Математична модель вимірювального перетворювача точки роси газу з вибірковістю вимірювань / Й. Й. Білінський, К. Ю. Іоніна, // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 3. — С. 170—175.

Рекомендована кафедрою електроніки

Стаття надійшла до редакції 8.11.12  
Рекомендована до друку 21.11.12

**Білінський Йосип Йосипович** — завідувач кафедри, **Іоніна Катерина Юрївна** — аспірантка.  
Кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця