

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

© Юрій Скрипник, Геннадій Юрчик*, 2002

Київська державна академія технологій та дизайну, кафедра “Автоматизація і комп’ютерні технології”,
вул. Немировича – Данченка, 2, 252011, Київ, Україна

*Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра “Електронні засоби інформаційно-комп’ютерних технологій”, вул. С. Бандери 12, 79013, Львів, Україна

Розглянуто метод контролю вологості газових середовищ за значеннями їх теплопровідностей за допомогою підігрівного напівпровідникового термоелемента, підвищена точність якого забезпечується використанням спеціального алгоритму визначення значення вологості й автоматичною корекцією домінуючих систематичних похибок.

Рассматривается метод контроля влажности газовых сред по значению их теплопроводности при помощи подогреваемого полупроводникового термоэлемента, повышенная точность которого обеспечивается путём использования специального алгоритма определения значения влажности и автоматической коррекцией доминирующих систематических погрешностей.

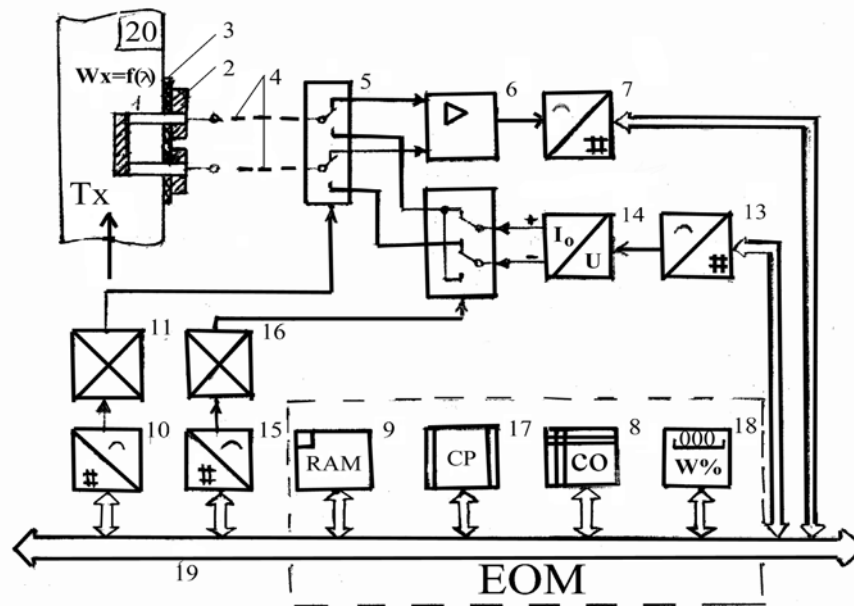
In the present article the author have considered the method of the gaseous media's humidity control in accordance with its value of thermal conductivity with the help of the heating semiconductor thermocouple which increased accuracy is assured by a special algorithm of determination of the value of the humidity as well as by the automatic correction of the systematic dominant errors.

Вологість газових середовищ доволі часто вимірюють за допомогою термоелектричного давача-термопар, у якого чутливий елемент (робочий кінець термопар) нагрівається електричним струмом і виконує роль джерела тепла і давача температури за значенням термоелектрорушійної сили (ТЕРС). Теплова рівновага робочого кінця термопар в камері, через яку проходить досліджувана газова суміш, при забезпеченні умов мінімізації конвективних і радіаційних теплових втрат робочого кінця, визначається теплопровідністю вологого газу, яка функціонально залежить від його вологості, а про значення самої вологості роблять висновок за величиною ТЕРС, що вимірюється на вільних кінцях термоелектричного давача [1,2]. Але складність забезпечення сталого припливу (відпливу) тепла до (від) робочого кінця давача не дає змоги забезпечити однозначність результатів вимірювання вологості. Це пояснюється тим, що теплообмін робочого кінця давача з оточуючим газовим середовищем залежить не тільки від вологості, але й від його температури, яка може доволі змінюватися в широкому діапазоні. Крім того, термоелектричні давачі з металевими електродами відрізняються порівняно низькою чутливістю, нелінійністю та нестабільністю перетворювальної характеристики, що не дає можливості вимірювати вологість

газових середовищ у широкому діапазоні з високою точністю.

Розглянуто метод контролю вологості газових середовищ вимірювальним каналом (ВК), у якому первинне перетворення здійснюється напівпровідниковим термоелементом (ТЕ) з електродами електронної та діркової провідностей. Порівняно з металевими термопарами перевагою ТЕ є хороша сталість їх електричних властивостей і високий коефіцієнт чутливості до температури (сотні мкВ/°С). Основними недоліками, які обмежують використання ТЕ у вимірювальній техніці, є нелінійність і невідтворюваність їх перетворювальних характеристик. Метод, що пропонується для контролю, використовує згадані вище переваги ТЕ і за допомогою спеціального алгоритму функціонування ВК дає можливість усунути похибку від нелінійності перетворювальної характеристики ТЕ, досягти однозначності при оцінці вологості газового середовища і, тим самим, підвищити точність результату контролю.

На рисунку подано структурну схему ВК вологості газового середовища, алгоритмічне функціонування якого забезпечується пристроєм управління й процесором ЕОМ.



Структурна схема вимірjувального каналу вологостi з термоелементом.

- 1 – термоелектричний елемент; 2 – теплодiвiдна шина; 3 – дiелектрична iзоляцiйна шайба;
 4 – лiнiя зв’язку; 5, 12 – керованi перемикачi; 6 – нормуючий пiдсилювач постiйної напруги; 7 – аналого–цифровий перетворювач; 8 – блок управлiння; 9 – оперативнo–запам’ятовувальний пристрiй; 10, 13, 15 – цифро–аналоговi перетворювачi; 11, 16 – виконавчi пристрiй; 14 – перетворювач постiйної напруги у постiйний струм;
 17 – процесор; 18 – цифровий iндикатор; 19 – загальна шина EOM;
 20 – камера з дослiджуваним газовим середовищем

Метод контролю вологостi газу полягає у такому. На початку експлуатацiї ВК його калiбрують в умовах, максимально наближених до експлуатацiйних. ТЕ розташовують так, що його робочий кiнець знаходиться в камерi з дослiджуваним газом, данi якого – теплопровiднiсть λ_k , вологiсть W_k , температура T_k наперед вiдомi (калiбрувальне середовище), а вiльнi кiнцi – при температурi оточуючого середовища T_0 . Значення ТЕРС, що виникає на вiльних кiнцях ТЕ, через лiнiю зв’язку 4 i контакти керованого перемикача 5 надходить на вхiд нормуючого пiдсилювача 6, з виходу якого сигнал надходить на вхiд аналого–цифрового перетворювача 7 i перетворюється у цифровий код.

$$N_1 = K(\alpha_{k1} T_k - \alpha_0 T_0), \quad (1)$$

де K – стале значення крутизни характеристики аналого–цифрового перетворювача; α_{k1} , α_0 – термоелектричнi коефiцiєнти робочого та вiльних кiнцiв ТЕ при температурах T_k i T_0 .

Значення коду N_1 заносять в оперативнo–запам’ятовуючий пристрiй 9. Далi змiнюють температуру

робочого кiнця ТЕ. Для цього за командою блока управлiння 8 за допомогою ЦАП 10 i виконавчого пристрiю 11 формується сигнал на перемикач контакти перемикача 5, внаслiдок чого через ТЕ пропускають постiйний струм, стале значення якого задається ЦАП 13 i перетворювачем 14. Струм має напрямок, при якому в робочому кiнцi ТЕ вiдбувається поглинання теплоти Пельтьє i вiдповiдне його охолодження. Одночасно в робочому кiнцi i в електродах ТЕ видiляється теплота Джоуля. Силу струму задають оптимальною вiдповiдно до вибраного типу ТЕ [3,4] з умови максимального охолодження i мiнiмального часу Δt досягнення теплової рiвноваги робочого кiнця ТЕ з дослiджуваним газом. Пiсля закiнчення часу Δt контакти перемикача 5 повертають у початковий стан та вимiрюють на вiльних кiнцях ТЕ зменшене миттєве значення ТЕРС, вiдповiдний цифровий код якої буде мати значення

$$N_2 = K[\alpha_{k2}(T_k - \Delta T_{k1}) - \alpha_0 T_0], \quad (2)$$

де ΔT_{k1} – температура усталеного охолодження робочого кінця ТЕ; α_{k2} – термоелектричний коефіцієнт робочого кінця ТЕ при температурі $T_k - \Delta T_{k1}$. Температура охолодження робочого кінця ТЕ визначається теплотою поглинання Пельтьє, теплотою Джоуля й теплопровідністю газового середовища:

$$\Delta T_{k1} = \frac{(\Pi_k I_0 - \mu I_0^2 R)}{\lambda_k F} \delta, \quad (3)$$

де $\Pi_k I_0$ – теплота Пельтьє; Π_k – коефіцієнт Пельтьє; I_0 – оптимальний струм через ТЕ; $\mu I_0^2 R$ – теплота Джоуля; $\mu = 0,5$ – коефіцієнт, що враховує розподіл теплоти Джоуля між робочим кінцем і електродами ТЕ; R – електричний опір ТЕ; λ_k – теплопровідність досліджуваного газу при температурі калібрування T_k ; F – площа поверхні робочого кінця ТЕ; δ – товщина шару досліджуваного середовища, через який відбувається теплопередача.

Зважаючи на те, що температура контрольованого газу у багатьох випадках знаходиться в межах $40^\circ\text{C} \leq T_x \leq 150^\circ\text{C}$, робочий кінець ТЕ має зовнішнє теплове навантаження, величина термоелектричного охолодження робочого кінця ТЕ невелика – $\Delta T_k \ll T_k$ і можна вважати, що $\alpha_{k1} \approx \alpha_{k2}$. Тоді, враховуючи співвідношення Томсона [4]

$\Pi_k = \frac{dE}{dT} T_k = \alpha_{k1} T_k$, цифровий код N_2 може бути поданий у вигляді

$$N_2 = K \left[\alpha_{k1} (T_k - \frac{\alpha_{k1} T_k I_0 - 0,5 I_0^2 R}{\lambda_k F} \delta) - \alpha_0 T_0 \right]. \quad (4)$$

Значення коду N_2 також заносять в оперативно-запам'ятовуючий пристрій 9. За відсутності струму в ТЕ температура його робочого кінця після короткої витримки відновлюється й у певний момент часу буде дорівнювати знову T_k , що фіксується процесором 17. За командою блока управління 8 формується сигнал керування на одночасне перемикання контактів перемикачів 5, 12 і через ТЕ пропускають заданий струм I_0 , але у зворотному напрямку і також упродовж часу Δt встановлення теплової рівноваги робочого кінця з досліджуваним газом. Після цього припиняють подавати керуючий сигнал на перемикачі 5, 12, контакти яких переходять у початковий стан і

вимірюють на вільних кінцях ТЕ збільшене миттєве значення ТЕРС, цифровий код якої буде мати значення

$$N_3 = K \left[\alpha_{k1} (T_k + \frac{\alpha_{k1} T_k + 0,5 I_0^2 R}{\lambda_k F} \delta) - \alpha_0 T_0 \right], \quad (5)$$

де $\Delta T_{k2} = \frac{\Pi_k I_0 + 0,5 I_0^2 R}{\lambda_k F} \delta$ – температура усталеного перегріву робочого кінця ТЕ відносно температури калібрування T_k .

Цифровий код N_3 запам'ятовують і за допомогою процесора 17 визначають різницю кодів

$$N_3 - N_2 = \frac{2\alpha_{k1}^2 T_k I_0}{\lambda_k F} \delta \quad (6)$$

та суму цифрових кодів за формулою

$$N_3 + N_2 - 2N_1 = \frac{\alpha_{k1} I_0^2 R}{\lambda_k F} \delta. \quad (7)$$

Якщо взяти відношення різниці кодів (6) до квадрата суми кодів (7), то отримаємо

$$\frac{N_3 - N_2}{(N_3 + N_2 - 2N_1)^2} = \frac{2FT_k}{I_0^3 R^2 \delta} \lambda_k. \quad (8)$$

Теплопровідність досліджуваного газу, у якому виконується калібрування ТЕ, і каналу вимірювання вологості, визначають із виразу (8)

$$\lambda_k = \frac{(N_3 - N_2) I_0^3 R^2 \delta}{2F(N_3 + N_2 - 2N_1)^2 T_k}. \quad (9)$$

З виразу (9) випливає, що значення теплопровідності газової суміші λ_k пов'язане з отриманими цифровими кодами N_1, N_2, N_3 і не залежить від термоелектричних коефіцієнтів α_k і Π_k . Тому незалежно від нелінійності та нестабільності статичної характеристики ТЕ можна обчислити теплопровідність газового середовища з іншою вологістю при іншій температурі. Використання запропонованого алгоритму при контролі газового середовища з невідомою вологістю W_x , яка визначає теплопровідність цього середовища λ_x при температурі T_x , аналогічно виразу (9) дає можливість визначити значення теплопровідності λ_x за формулою

$$\lambda_x = \frac{(N_{3x} - N_{2x}) I_0^3 R^2 \delta}{2F(N_{3x} + N_{2x} - 2N_{1x})^2 T_x}, \quad (10)$$

де T_x – температура контрольованого середовища, яка визначається за значенням цифрового коду N_{1x} .

Якщо вираз (10) розділити на вираз (9), то отримаємо співвідношення

$$\frac{\lambda_x}{\lambda_k} = \frac{(N_{3x} - N_{2x})(N_3 + N_2 - 2N_1)^2 T_k}{(N_3 - N_2)(N_{3x} + N_{2x} - 2N_{1x})^2 T_x}. \quad (11)$$

Виходячи з виразу (11), одержуємо формулу для визначення теплопровідності контрольованого середовища з врахуванням теплопровідності λ_k і температури T_k калібрувального середовища

$$\lambda_x = \frac{(N_{3x} - N_{2x})(N_3 + N_2 - 2N_1)^2 T_k}{(N_3 - N_2)(N_{3x} + N_{2x} - 2N_{1x})^2 T_x} \lambda_k. \quad (12)$$

Висока точність і зручність формули (12) порівняно з (10) полягає у відсутності в ній величин I_0 , R , F і визначенні шуканої теплопровідності лише за допомогою цифрових кодів N_1 , N_2 , N_3 , зафіксованих у пам'яті ЕОМ при попередньому калібруванні ТЕ у середовищі з відомою вологістю W_k , та цифрових кодів N_{1x} , N_{2x} , N_{3x} , отриманих при контролі газового середовища з невідомою вологістю W_x .

Користуючись описаним вище алгоритмом і формулою (12), за допомогою відомих методів градування вологомірів [5,6] із застосуванням розчинів солей (наприклад, KCl , $NaCl$), встановлюють у заданому робочому діапазоні функціональну залежність між вологістю і теплопровідністю $W = f(\lambda)$ досліджуваного газу, яку заносять в оперативно-запам'ятовуючий пристрій 9 і використовують надалі для визначення невідомої вологості контрольованого середовища при певній температурі за значенням його теплопровідності. Одночасно знаходять функціональну залежність вихідної ТЕРС ТЕ від температури $E = f(T)$ досліджуваного газового середовища згідно з рівнянням (1), яку також заносять в оперативно-запам'ятовуючий пристрій 9 і застосовують надалі для визначення температури газового середовища T_x .

При контролі вологості відносно установленої норми W_H в межах $\pm \Delta W$ ($\Delta W \ll W_H$) можна вважати,

що відносні зміни $\Delta W / W_H$ пропорційні до відносних змін теплопровідності, тобто

$$\frac{\Delta W}{W_H} = \chi \frac{\Delta \lambda}{\lambda_H}, \quad (13)$$

де χ – коефіцієнт пропорційності між вологістю і теплопровідністю газового середовища за функціональною залежністю.

Якщо $\Delta W \ll W_H$, то коефіцієнт χ – величина постійна у широкому діапазоні значень ΔW . Тому відносні зміни вологості з врахуванням виразу (12) можна визначити за формулою

$$\frac{\Delta W_x}{W_H} = \chi \left[\frac{(N_{3x} - N_{2x})(N_3 + N_2 - 2N_1)^2 T_k}{(N_3 - N_2)(N_{3x} + N_{2x} - 2N_{1x})^2 T_x} - 1 \right]. \quad (14)$$

Отже, визначення теплопровідності, яка пов'язана функціональною залежністю з вологістю або відносних відхилень вологості від норм за формулами (12), (14), у які входять тільки виміряні величини та відомі параметри калібрувального середовища і не входять непостійні термоелектричні коефіцієнти давача, а також його геометричні параметри, дає змогу підвищити точність контролю вологості газових середовищ без стабілізації електричної потужності, яка розсіюється чутливим елементом, і лінеаризації статичної характеристики давача.

1. Коротков П.А., Лондон Г.Е. *Динамические контактные измерения тепловых величин.* – Л., 1974.
2. Патент 2014590 (РФ). *Способ контроля влажности газовых сред и устройство для его осуществления* / Скрипник Ю.А., Химичева А.И., Юрчик Г.В., Водотовка В.И./Б.И., 1994, №11.
3. Анатычук Л.И. *Термоэлементы и термоэлектрические устройства.* Справочник. – К., 1979.
4. Иорданишвили Е.К., Бабин В.П. *Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии.* – М., 1983.
5. Бегунов А.А. *Теоретические основы и технические средства гигрометрии.* Метрологические аспекты. – М., 1988.
6. Шевцов Е.К. *Справочник по поверке и наладке приборов.* – К., 1981.