

МЕТОД ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯНИХ І ПАРОГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

© Юрчик Г., Клювак А., 2016

Розглянуто науково-прикладну проблему підвищення достовірності методу вимірювального контролю вологості повітряних і парогазових середовищ як одного із визначальних параметрів багатьох технологічних процесів теплової обробки різних речовин та матеріалів цифровими вологомірами з підігрівними термоелектричними первинними перетворювачами.

Ключові слова: вимірювальний контроль, термоелектричний перетворювач вологості, теплопровідність середовища, реверсивний термоелектричний ефект Пельтьє, функція перетворення вологоміра, автокорекція похибок, точність методу, температурна адитивна і мультиплікативна похибки вимірювання.

The paper is devoted to improving of moisture measuring control in gases and steam by means of digital moisture meter with thermoelectric transducer, which is important for multiple technological processes that involve heat processing of various substances.

Key words: measure control, thermoelectric transducer, moisture meter transform function, reverse thermoelectric effect, auto-correction of error of measurement, measuring accuracy, additive and multiplicative errors of temperature measurement.

Вступ

У різних галузях промисловості України, пов'язаних з технологічними процесами теплової обробки різноманітних видів сировини та матеріалів, а саме сушінням сільськогосподарської продукції, пиломатеріалів, будівельних, колоїдних матеріалів, пастеризації харчових продуктів і багатьох інших, існує потреба в автоматичних засобах вимірювання, контролю і регулювання вологості повітряних та парогазових середовищ в об'ємах робочих камер з розміщеними в них речовинами та матеріалами, що піддаються тепловій обробці.

Для вимірювання і контролю вологості повітряних і парогазових середовищ з температурою до +150°C у промисловості найчастіше використовують вологоміри, в яких реалізуються відомі методи: точки роси, психрометричний, а також методи із застосуванням адсорбційних сенсорів[1]. Використання цих методів в умовах промислових об'єктів не завжди дає змогу достовірно контролювати вологість внаслідок низької точності вимірювання з похибкою на рівні $\pm(5-10)\%$. Крім того, існують різні технічні складності використання зазначених методів. Відомі також методи контролю вологості із застосуванням як первинного перетворювача вологості підігрівного металевого термоелектричного перетворювача (ТЕП) [2, 3]. У цьому випадку додаткове нагрівання робочого кінця ТЕП відносно температури контрольованого середовища здійснюють електричним струмом, який пропускають по електродам ТЕП, з використанням реверсивного термоелектричного ефекту Пельтьє в робочому кінці ТЕП, або ефекту Джоуля в термоэлектродах. При однакових потужностях нагрівання або охолодження робочого кінця ТЕП завдяки ефекту Пельтьє величина термоелектрорушійної сили (ТЕРС) на виході ТЕП функціонально залежить від інтенсивності тепловіддачі робочого кінця ТЕП в контрольоване середовище, а отже, від його вологості. Проте

складність забезпечення сталого припливу (відпливу) тепла до (від) робочого кінця ТЕП не дозволяє забезпечити однозначність результатів вимірювання і, відповідно, здійснити контроль вологості середовища з високою достовірністю. Це пояснюється тим, що процес теплообміну робочого кінця ТЕП з навколишнім середовищем залежить не лише від вологості, але й від його температури, яка може довільно змінюватись у доволі широкому діапазоні і викликати суттєву температурну похибку.

У відомому термоелектричному вологомірі [4] досягається ця температурна похибка компенсується автоматичною зміною коефіцієнта підсилення підсилувача вихідного сигналу ТЕП на величину, пропорційну збільшенню або зменшенню температури контрольованого середовища відносно температури первинного градування вологоміра. Проте недоліком цього вологоміра є низька чутливість та присутність мультиплікативної похибки, яка зумовлена температурною зміною коефіцієнта Пельтьє робочого кінця ТЕП.

Розглянуто запропонований метод автоматичного контролю вологості повітряних і парогазових середовищ термоелектричним вологоміром, в якому усуваються вищезгадані недоліки відомих методів і підвищується достовірність контролю вологості завдяки підвищенню чутливості вологоміра і автокорегуванню домінуючих температурних похибок як адитивного, так і мультиплікативного характерів.

Метод вимірювального контролю вологості середовищ

У запропонованому методі контролю вологості вимірювальне перетворення здійснюється напівпровідниковим термоелементом (ТЕ) з електродами електронної та діркової провідностей. Поверхнею теплообміну цього ТЕ з контрольованим вологим середовищем є тонкоплівкова металева пластинка між його електродами завтовшки 0,005–0,01 мм. Порівняно з металевим термоелектричними перетворювачами, що використовуються у відомих методах, наприклад, типу хромель-алюмель, хромель-копель та ін., ТЕ відрізняються кращою стабільністю термоелектричних властивостей, меншою інерційністю і, головне, на порядок вищим коефіцієнтом чутливості до температури ($\alpha=210\pm 250\text{мкВ}/^\circ\text{C}$) [5]. До основних недоліків, що обмежують використання ТЕ у вимірювальній техніці, слід віднести нелінійність і невідтворюваність їх градувальних характеристик (ГХ) [6]. Проте, індивідуальне градування вологоміра в робочих межах лінійно апроксимованої ділянки ГХ ТЕ, яка містить робочу температурну точку первинного градування вологоміра, дозволяють мінімізувати похибку від нелінійності ГХ ТЕ, яка не перевищує $\pm 0,2\%$. А здійснення автокорекції згаданих вище температурних похибок відомих методів вимірювального контролю дозволяє одержати вихідний інформаційний сигнал вологоміра пропорційним змінам вологості контрольованого середовища.

На рис. 1 наведено структурну схему термоелектричного вологоміра з автокорегуванням температурних похибок, за допомогою якого реалізується запропонований метод.

Метод вимірювального контролю вологості повітряних і парогазових середовищ полягає у наступному. Чутливий елемент первинного перетворювача вологоміра, тобто робоча поверхня теплообміну ТЕ 5, розташована в об'ємі 4 з контрольованим вологим середовищем. Вологомір функціонує в імпульсному режимі, за якого прямокутною напругою комутаційного генератора 19 із заданою частотою f_0 за допомогою керованих перемикачів 2 і 3 через ТЕ 5 від джерела 1 пропускається оптимальний постійний струм I_0 у прямому і зворотному напрямках. Частота прямокутних імпульсів обирають за умови $1/f_0 \leq \pi\tau$, де τ – теплова стала ТЕ, $n=(0,5+1,0)$, а оптимальний струм I_0 – з умови $I_0\pi t \gg I_0^2 R t$, де $\Pi = \frac{dE}{dT} T$ і R – відповідно коефіцієнт Пельтьє і електричний опір робочого кінця ТЕ; $\alpha = \frac{dE}{dT}$ – термоелектричний коефіцієнт робочого кінця ТЕ; T – температура робочого кінця; E – термоелектрорушійна сила ТЕ; $I_0\pi t = Q_n$; $I_0^2 R t = Q_{дж}$ – відповідно теплота Пельтьє, що виділяється або поглинається в робочому кінці ТЕ, і теплота Джоуля, яка виділяється в робочому кінці ТЕ 5 за прямого і зворотного напрямків протікання імпульсів струму амплітудою I_0 і тривалістю t . У результаті температура робочого кінця ТЕ буде

періодично з частотою f_0 підвищуватися і знижуватися на величину $\pm\Delta T$ відносно температури контрольованого середовища [7].

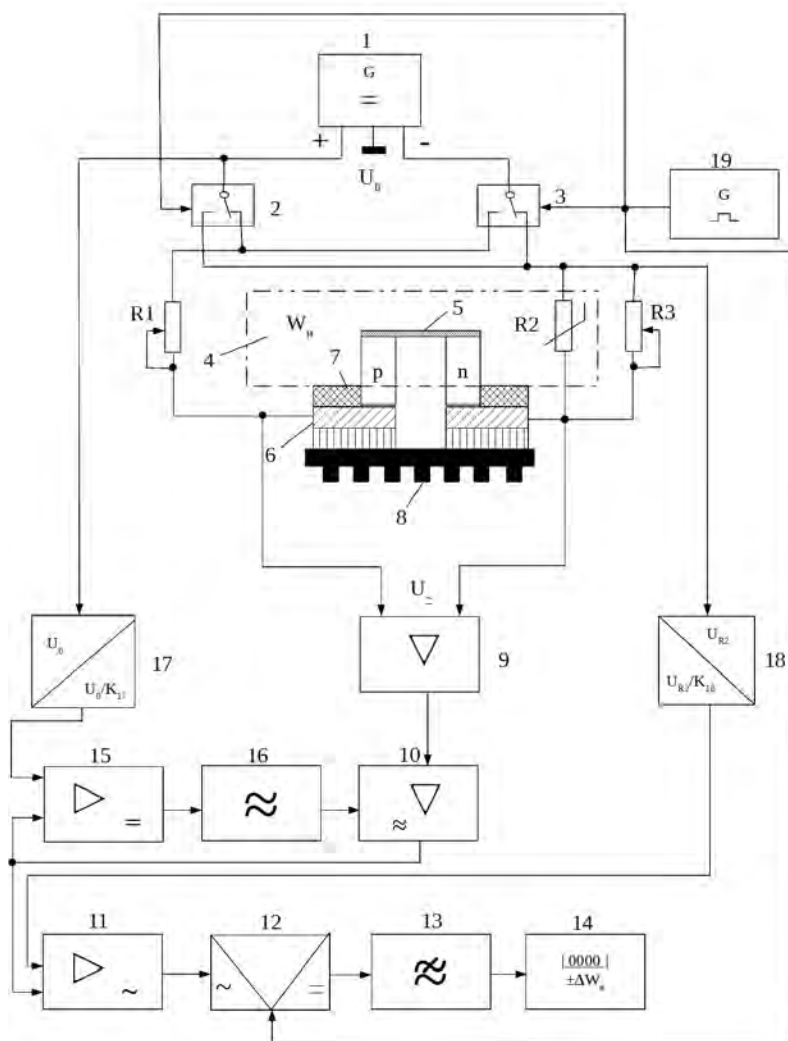


Рис. 1. Структурна схема термоелектричного вологоміра повітряних і парогазових середовищ з автокорегуванням температурних похибок: 1 – джерело стабілізованої постійної напруги; 2, 3 – керовані автоматичні перемикачі; 4 – робочий об’єм з контрольованим вологим середовищем; 5 – поверхня теплообміну термоелемента з навколишнім середовищем; 6 – струмопідводи ТЕ; 7 – діелектричні ізолятори; 8 – вузол стабілізації або компенсації зміни температури вільних кінців термоелемента; 9, 11, 15 – диференціальні підсилювачі; 10 – керований широкосмуговий підсилювач; 12 – фазочутливий випрямляч; 13, 16 – фільтри нижніх частот; 14 – цифровий індикатор відхилення контрольованої вологості від нормованого значення W_H ; 17, 18 – подільники напруги; 19 – комутаційний генератор; R_1 – резистор для встановлення оптимального струму I_0 через термоелемент; R_2 – нікелевий терморезистор, увімкнений у ланцюг живлення ТЕ і розташований у робочому об’ємі 4 з контрольованим вологим середовищем; R_3 – манганіновий резистор, за допомогою якого встановлюється допустимий струм через терморезистор R_2

Значення температури ΔT переважно визначається кількістю теплоти Пельтьє Q_{Π} і теплофізичними особливостями вологого середовища [3]:

$$\Delta T = \frac{Q_{\Pi}}{\eta F} = \frac{\delta \Pi}{\lambda [1 + A(T_x - T_r)] F}, \quad (1)$$

де η – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні робочого кінця ТЕ площею F ; δ – товщина шару середовища, що оточує поверхню теплообміну, тобто робочий кінець ТЕ; λ – теплопровідність

контрольованого вологого середовища при температурі градування вологоміра T_r ; T_x і A – відповідно поточне значення температури і температурний коефіцієнт теплопровідності контрольованого середовища.

Теплопровідність повітряних і парогазових середовищ залежить від температури і, як видно з формули (1), має лінійний характер у вигляді $\lambda = \lambda_0[1 + A(T_x - T_r)]$, де λ і λ_0 – теплопровідність сухого газу при температурах T_x і T_r . Температурний коефіцієнт A розповсюджених газів може набувати значення від $260 \cdot 10^{-5}$ (азот, водень, оксид вуглецю) до $980 \cdot 10^{-5}$ (пари бензину). Водночас залежність теплопровідності повітря і парогазових сумішей від їх вологовмісту не підпорядковується простому адитивному закону, і її важко обчислити за значеннями теплопровідності вологого середовища та компонентів парогазових середовищ. Тому залежність теплопровідності λ від вологості W при заданій температурі T_r контрольованого середовища визначається експериментально у процесі градування вологоміра.

З урахуванням температури контрольованого середовища T_x і додаткового нагрівання робочого кінця ТЕ імпульсом струму прямого напрямлення I_0 значення термоелектрорушійної сили (ТЕРС) на вільних кінцях ТЕ згідно з (1) набуває значення

$$E_1 = S(T_x + \Delta T_1 - T_0) = S \left[T_x + \frac{\delta \Pi}{\lambda[1 + A(T_x - T_r)]F} - T_0 \right], \quad (2)$$

де T_0 – стабільна температура вільних кінців ТЕ; S – чутливість ТЕ.

За зміни напрямку струму через ТЕ на зворотний температура його робочого кінця зміниться на величину

$$\Delta T_2 = \frac{-(\delta \Pi)}{\lambda[1 + A(T_x - T_r)]F}, \quad (3)$$

а відповідне значення ТЕРС на вільних кінцях ТЕ зміниться і набуває значення

$$E_2 = S(T_x - \Delta T_2 - T_0) = S \left[T_x - \frac{\delta \Pi}{\lambda[1 + A(T_x - T_r)]F} - T_0 \right]. \quad (4)$$

Автоматично порівнюють одержані значення ТЕРС (2) і (4) та визначають їх різницю

$$\Delta U_1 = E_1 - E_2 = 2S \frac{\delta \Pi}{\lambda[1 + A(T_x - T_r)]F}, \quad (5)$$

яку множать на величину, пропорційну різниці поточної температури контрольованого середовища і температури градування вологоміра T_r , тобто на величину $[1 + B(T_x - T_r)]$, де $B = A$. У результаті одержують значення напруги, яке можна представити виразом

$$\Delta U_2 = 2S \frac{\delta \Pi}{\lambda F}. \quad (6)$$

Напругу ΔU_2 порівнюють з частиною падіння напруги на терморезисторі R_2 , який увімкнений у ланцюг живлення термоелемента, і виділяють значення напруги

$$\Delta U_3 = K_{18} R_2 I_0 - \Delta U_2, \quad (7)$$

де K_{18} – коефіцієнт перетворення подільника напруги 18 , який обирають так, щоб при номінальному (заданому) значенні вологості середовища $W = W_n$ напруга ΔU_3 дорівнювала нулю, тобто $\Delta U_3 = 0$.

Отже, за відхилення вологості контрольованого середовища від її нормованого значення одержують відповідну різницю напруг

$$\Delta U_4 = \left[K_{18} R_2 I_0 - 2S \frac{\delta \Pi I_0}{(\lambda_n + \Delta \lambda) F} \right], \quad (8)$$

де λ_n – теплопровідність контрольованого вологого середовища з номінальною вологістю, тобто нормою; $\Delta \lambda$ – зміна теплопровідності середовища при відхиленні його вологості від норми.

Враховуючи, що інформаційні відхилення теплопровідності малі порівняно з теплопровідністю контрольованого вологого середовища при заданій вологості W_n , а різниця

$$K_{18} R_2 I_0 - 2S \frac{\delta \Pi I_0}{\lambda_n F} = 0, \quad (9)$$

можна вважати, що напруга ΔU_4 при відхиленні вологи від норми буде представлена виразом

$$\Delta U_4 = \pm K_{18} R_2 I_0 \frac{\Delta \lambda}{\lambda}. \quad (10)$$

Оскільки відношення $\Delta\lambda/\lambda_n$ пропорційне відхиленню вологості середовища від заданого значення ($\Delta W/W_n$), то за різницевою напругою ΔU_4 і значенням коефіцієнта K_{18} можна судити про рівень вологості контрольованого середовища при зміні його температури у робочих межах або відхиленні її від нормованого значення. Ураховуючи, що струм I_0 пропорційний напрузі джерела живлення 1, функція вимірювального перетворення вологоміра набуде вигляду

$$N = \pm K_{\text{Тп}} K_{12} K_{13} K_{14} U_0 \frac{\Delta W}{W_n} = \pm K U_0 \frac{\Delta W}{W_n}, \quad (11)$$

де N – цифровий показ індикатора 14 про відхилення вологості контрольованого середовища від норми W_n ; $K_{\text{Тп}}$ – коефіцієнт пропорційності, що враховує залежність теплопровідності середовища від його вологості [$\lambda=f(W)$]; K_{12} , K_{13} і K_{14} – коефіцієнти перетворення відповідно фазочутливого випрямляча 12, фільтра нижніх частот 13 та аналого-цифрового перетворювача 14; K – загальний коефіцієнт перетворення напруги ΔU_4 на цифровий вираз відхилення рівня вологи від норми.

Як було зазначено вище, реалізують цей метод вимірювального контролю вологості за допомогою вологоміра (рис. 1), в якому завдяки безперервній роботі перемикачів 2 і 3 відбувається циклічний процес термоелектричного нагрівання та охолодження робочого кінця ТЕ. У цьому випадку ТЕРС на виході ТЕ поряд із постійною складовою, що є пропорційною до температури контрольованого середовища, містить також і змінну складову, зумовлену температурами перегріву-охолодження $\pm\Delta T$ робочого кінця ТЕ, амплітуди яких відповідно до виразу (1), визначаються коефіцієнтом тепловіддачі робочого кінця ТЕ, залежного (в основному) від теплопровідності контрольованого середовища, тобто від його вологості. ТЕРС з виходу ТЕ через узгоджувальний підсилювач 9 надходить на широкосмуговий підсилювач 10, коефіцієнт підсилення якого регулюється сигналом диференціального підсилювача 16. Сигнал після підсилювача 10 порівнюється у диференціальному підсилювачі 11 з частиною падіння напруги від знакозмінного струму на терморезисторі R_2 . При номінальному (нормі) значенні вологості W_n подільником напруги 18 устанавлюють нуль на виході підсилювача 11. Коли вологість середовища відхиляється від норми, змінна складова ТЕРС на виході ТЕ змінюється, а падіння напруги на терморезисторі R_2 залишається незмінним. Різниця напруг підсилюється диференціальним підсилювачем 11 і після проходження через фазочутливий випрямляч 12 та фільтр 13 реєструється цифровим індикатором 14, що проградуєований в одиницях відхилення вологості середовища від норми (W_n). При виході значення вологості за межі нормованого допуску інформативний сигнал ΔU_4 з виходу фільтра нижніх частот 13 подається також на авторегулятори вологості в об'ємі робочої камери 4.

Проте, неминучі відхилення температури контрольованого середовища від температури градування вологоміра порушують умову компенсації (9) унаслідок появи похибки, зумовленої зміною коефіцієнта Пельтьє робочого кінця ТЕ. Для автокорегування цієї похибки та усунення нестабільності нуля вологоміра використовується нікелевий терморезистор R_2 , увімкнений у ланцюг живлення ТЕ і розташований у контрольованому середовищі 4. У цьому випадку (при автокорегуванні температурної похибки напівпровідникового ТЕ) нікелевий терморезистор застосовують як оптимальний з погляду високої лінійності його перетворювальної характеристики у діапазоні робочих температур від 40 до 130 °С і порівняно з платиновим або мідним він має вищий температурний коефіцієнт електричного опору $r=6,66 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ і питомий опір $\rho=12,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [8].

Неінформативні зміни амплітуди змінної складової ТЕРС від температурних змін теплопровідності середовища компенсуються протифазними змінами коефіцієнта підсилення підсилювача 10. Для цього постійна складова напруги з виходу підсилювача 10 порівнюється у диференціальному підсилювачі 15 з частиною постійної напруги U_0 джерела живлення 1, яка регулюється подільником напруги 17. При температурі градування вологоміра T_r вхідні напруги підсилювача 15 однакові і керівний сигнал на підсилювач 10 дорівнює нулеві. Відхилення температури середовища від температури T_r спричиняє зміни постійної складової ТЕРС, а, отже, і коефіцієнта підсилення підсилювача 10, чим вноситься відповідна корекція у підсилення змінної складової ТЕРС і таким чином усувається мультиплікативна похибка вологоміра.

Висновки

Отже, достовірність вимірювального контролю вологості повітряних і парогазових середовищ методом з підігрівним первинним перетворювачем підвищують, використовуючи замість металевого термоелектричного перетворювача чутливішого до температури напівпровідникового термоелемента і автокорегуванням домінуючих похибок як від зміни теплопровідності середовища при відхиленні його температури від температури градування вологоміра, так і від неконтрольованих температурних змін коефіцієнта Пельтьє робочого кінця ТЕ.

При неконтрольованих змінах струму I_0 одночасно змінюється і компенсуюча напруга на другому вході диференціального підсилювача 11, унаслідок чого забезпечується високостабільний нуль (при W_n) цифрового індикатора 14. Завдяки наявності фазочутливого випрямляча 12 відхилення вологості від норми спричиняють пропорційні і різні за знаком покази цифрового індикатора 14, що дає можливість забезпечити допусковий контроль вологості у різних точках середовища.

Проведені дослідження запропонованого методу показують, що похибка вимірювання при контролі вологості повітряних і парогазових середовищ у робочому об'ємі сушильних камер у діапазоні від 48 до 95 % і температурах від 40 до 130 °C знаходиться на рівні $\pm(0,5 \div 1,0)\%$. Температурна інваріантність запропонованого вологоміра дає змогу використовувати його у системах програмного регулювання вологості різних контрольованих середовищ.

1. Измерения в промышленности: Справочник в 3-х кн. / под ред. П. Профоса. Пер. с нем. под ред. Д. И. Агейкина. Книга 3. – М.: Металлургия. – 1990. – 343 с. 2. Дульнев Г. Н. Тепло и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г. Н. Дульнев. – М. : Высшая школа, 1984. – 247 с. 3. Коротков П. А. Динамические контактные измерения тепловых величин / П. А. Коротков, Г. Е. Лондон. – Л. : Машиностроение, 1974. – 224 с. 4. Скрипник Ю. О. Термоелектричний вологомір парогазових середовищ / Ю. О. Скрипник, Г. В. Юрчик, В. І. Водотовка, О. М. Хоменко // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2002. – № 460. С. 37–41. 5. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств / А. П. Ненашев. – М. : Высшая школа, 1990. – 432 с. 6. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: справочник / Л. И. Анатычук. – К. : Наукова думка, 1979. – 768 с. 7. Иорданишвили Е. К. Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии / Е. К. Иорданишвили, В. П. Бабин. – М. : Наука, 1983. – 216 с. 8. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 703 с.