

## ТЕОРІЯ ТА ТЕХНІКА ВИМІРЮВАНЬ

УДК 533.275

Юрій Скрипник, Геннадій Юрчик\*, Володимир Водотовка, Олег Хоменко  
Київська державна академія технологій та дизайну,  
кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій  
\*Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра електронних засобів інформаційних та комп'ютерних технологій

### ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ВОЛОГОМІР ПАРОГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

© Скрипник Юрій, Юрчик Геннадій, Водотовка Володимир, Хоменко Олег, 2002

**High-temperature steam-gas environment thermoelectrical hygrometer is considered with transformation via thermocouple. The humidity determination method is based on thermocouple operating end heat emission dependence when the operating end is placed in controlled environment and is heated or cold additionally .**

Створення в багатьох галузях нових автоматизованих технологій виробництва як промислових матеріалів, так і харчових продуктів, пов'язаних з процесами прискореного сушіння цих виробів при температурі вище ніж 100°C, вимагає розробки і застосування нових високоточних вологомірів безперервного контролю вологості у сушильних камерах суміші нагрітого повітря (газу) й водяної пари. Сушіння повинно закінчуватися при певній вологості кожного виду виробів, а точне додержання значення залишкової вологості є гарантією якості і визначеного терміну збереження.

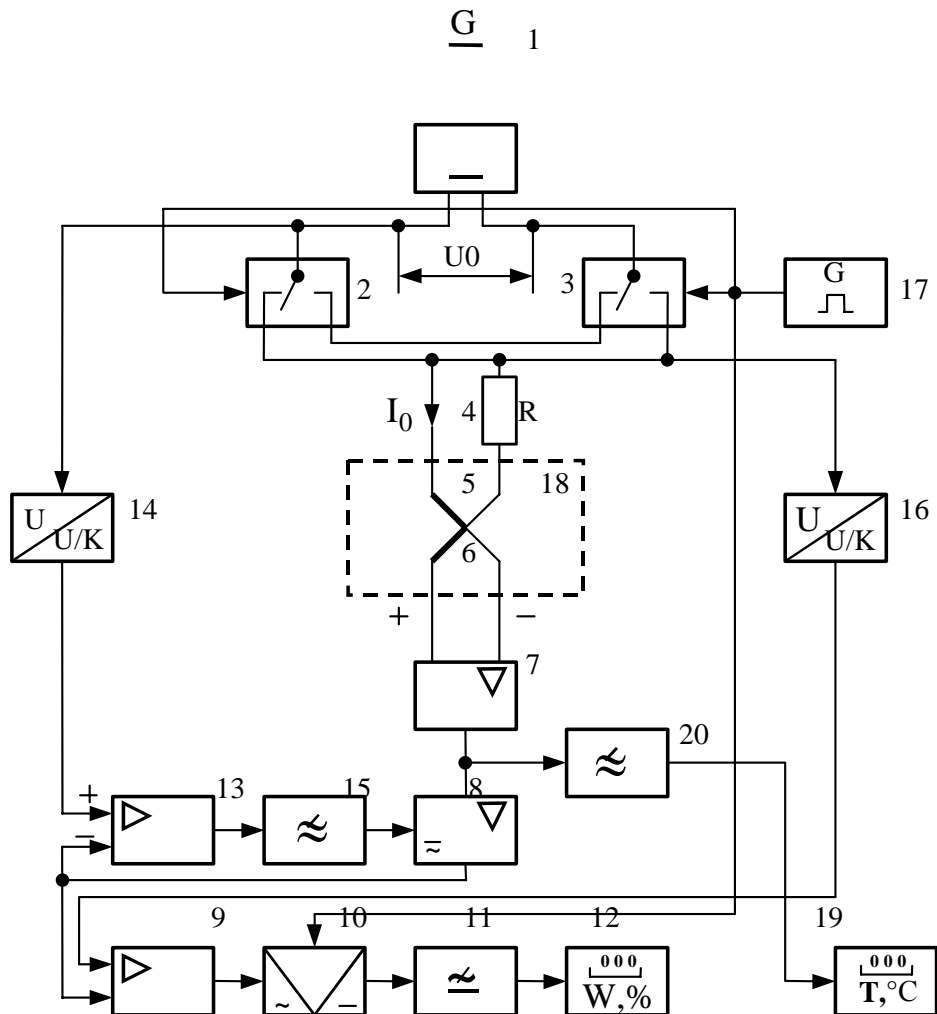
Для вимірювання вологості парогазових середовищ з температурою до 100°C найчастіше в промисловості використовують вологоміри, які реалізують відомі методи: точки роси, психрометричний метод, а також методи з застосуванням адсорбційних сенсорів [1]. Аналіз похибок вимірювання і досвід експлуатації цих вологомірів в умовах підвищених температур (до 150°C) при одночасній вимозі забезпечення безперервного контролю технологічних процесів з нормованою точністю не завжди дають бажані результати.

Розглянемо термоелектричний вологомір високотемпературних парогазових середовищ, вимірювальне перетворення у якому здійснюється за допомогою термопари, а в основу методу визначення вологості покладена залежність інтенсивності тепловіддачі додатково підігрітого чи охолодженого робочого кінця термопари, розташованої в контрольованому середовищі. Теплообмін поверхні робочого кінця термопари з оточуючим його парогазовим середовищем відбувається переважно кондуктивно, тобто за рахунок теплопровідності цього середовища.

На рисунку наведено схему термоелектричного вологоміра парогазових середовищ.

Метод вимірювання [2] полягає в такому. Робочі кінці термопар 5 і 6, жорстко з'єднані між собою зваркою, розташовують в контрольованому середовищі з певним об'ємом 18. Цикл вимірювання здійснюється за тактами комутаційного генератора 17, імпульсами прямокутної форми якого відбувається почергове перемикачів 2 і 3. Період

слідування імпульсів генератора 17 вибирають більшим від теплової сталої термопар 5 і 6. При одному положенні перемикачів 2 і 3 через робочий спай термопар 5 і резистор 4 від джерела 1 з напругою  $U_0$  протікає постійний струм одного напрямку, а при другому положенні перемикачів – протилежного напрямку. Відбуваються послідовні процеси усталеного перегріву та охолодження робочого спаю термопар за рахунок спочатку виділення, а потім поглинання в ньому тепла Пельтьє  $Q_{\text{П}}=\Pi \cdot I$ , де  $\Pi$  – коефіцієнт Пельтьє робочого спаю термопар,  $I$  – постійний струм через робочий спай термопар 5.



*Термоелектричний вологомір: 1 – джерело стабілізованої постійної напруги;  
 2, 3 – автоматичні перемикачі; 4 – калібрований резистор;  
 5, 6 – термопары одного типу з загальним робочим спаєм;  
 7, 9, 13 – диференціальні підсилювачі; 8 – широкосмуговий підсилювач;  
 10 – фазочутливий випрямляч; 11, 15 – фільтри нижніх частот;  
 12 – цифровий індикатор вологості; 14, 16 – подільники напруги;  
 17 – комутаційний генератор; 18 – об'єм з контрольованим середовищем;  
 19 – цифровий індикатор температури середовища; 20 – фільтр нижніх частот*

Температура перегріву (охладження) робочого кінця термопар визначається кількістю теплоти Пельтьє і теплофізичними параметрами парогазового середовища [3]

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{П}}}{\alpha \cdot F} = \frac{\delta \cdot \Pi \cdot I}{\lambda \cdot [1 + A \cdot (T_{\text{X}} - T_{\text{Г}})] \cdot F}, \quad (1)$$

де  $\Delta T$  – температура перегріву (охладження) робочого кінця термопар відносно оточуючого середовища;  $Q_{\text{П}}$  – потужність, що витрачається на додаткову зміну температури робочого кінця термопар;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні робочого кінця термопар площею  $F$ ;  $\delta$  – товщина шару середовища, через який відбувається теплопередача;  $\lambda$  – теплопровідність вологого середовища при температурі градування  $T_{\text{Г}}$ ;  $T_{\text{X}}$  – температура вологого середовища;  $A$  – температурний коефіцієнт теплопровідності парогазового середовища.

Теплопровідність повітря і різних газів залежить від температури, причому ця залежність у багатьох випадках, як видно з формули (1), має лінійний характер у вигляді  $\lambda = \lambda_0 \cdot [1 + A \cdot (T_{\text{X}} - T_{\text{Г}})]$ , де  $\lambda$  і  $\lambda_0$  – теплопровідність сухого газу при температурі  $T_{\text{X}}$  і  $T_{\text{Г}}$ ;  $\Delta T = (T_{\text{X}} - T_{\text{Г}})$  – зміна температури. Температурний коефіцієнт  $A$  поширених газів може набувати значення від  $260 \cdot 10^{-5}$  (азот, водень, окис вуглецю) до  $980 \cdot 10^{-5}$  (пари бензину). Водночас залежність теплопровідності повітря та інших газових сумішей від їх вологовмісту не підкоряється простому адитивному закону і її важко обчислити за значеннями теплопровідності водяного пару та інших компонентів суміші. Тому залежність теплопровідності  $\lambda$  від вологості  $W$  при заданій температурі контрольованого середовища  $T_{\text{Г}}$  визначається експериментально під час градування [ $\lambda = f(W)$ ].

З урахуванням температури контрольованого середовища  $T$  і додаткового перегріву загального робочого кінця термопар 5 і 6 значення термоелектрорушійної сили (ТЕРС) на вільних кінцях термопар 6 з врахуванням (1) буде таким

$$E_1 = S \cdot (T + \Delta T_1 - T_0) = S \cdot \left[ T + \frac{\delta \cdot \Pi \cdot I}{\lambda \cdot [1 + A \cdot (T_{\text{X}} - T_{\text{Г}})] \cdot F} - T_0 \right], \quad (2)$$

При зміні напрямку струму через спай термопар 5 температура робочого кінця термопар знизиться на

$$\Delta T_2 = - \frac{\delta \cdot \Pi \cdot I}{\lambda \cdot [1 + A \cdot (T_{\text{X}} - T_{\text{Г}})] \cdot F}, \quad (3)$$

А відповідне значення ТЕРС на вільних кінцях термопар 6 зміниться і стане таким

$$E_2 = S \cdot (T - \Delta T_2 - T_0) = S \cdot \left[ T - \frac{\delta \cdot \Pi \cdot I}{\lambda \cdot [1 + A \cdot (T_{\text{X}} - T_{\text{Г}})] \cdot F} - T_0 \right]. \quad (4)$$

Далі порівнюють отримані значення ТЕРС (2) і (4) і визначають їх різницю

$$\Delta U_1 = E_1 - E_2 = 2 \cdot S \cdot \frac{\delta \cdot \Pi \cdot I}{\lambda \cdot [1 + A \cdot (T_{\text{X}} - T_{\text{Г}})] \cdot F}, \quad (5)$$

яку змінюють у кількість разів, пропорційну до різниці температури контрольованого середовища і температури градування  $T_{\text{Г}}$

$$\Delta U_2 = [1 + B \cdot (T_{\text{X}} - T_{\text{Г}})] \cdot \Delta U_1, \quad (6)$$

де  $B$  – коефіцієнт пропорційності. Якщо вибрати цей коефіцієнт таким, що дорівнює числово температурному коефіцієнту теплопровідності  $A$ , тобто  $B=A$ , то значення напруги  $\Delta U_2$  буде дорівнювати

$$\Delta U_2 = 2 \cdot S \frac{\delta \cdot \Pi \cdot I}{\lambda \cdot F}. \quad (7)$$

Отриману напругу  $\Delta U_2$  порівнюють з частиною падіння напруги на каліброваному резисторі 4, який увімкнений в ланцюг термопар 5, в результаті чого виділяють напругу

$$\Delta U_3 = K \cdot R_4 \cdot I - \Delta U_2, \quad (8)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності, який вибирають так, щоб при номінальному (заданому) значенні вологості  $W=W_n$  напруга  $U_3$  дорівнювала нулю, тобто  $\Delta U_3 = 0$ .

Тоді при зміні вологості контрольованого середовища отримують відповідну різницю напруг

$$\Delta U_4 = [K \cdot R_4 - 2 \cdot S \frac{\delta \cdot \Pi}{(\lambda_H \pm \Delta \lambda) \cdot F}] \cdot I, \quad (9)$$

де  $\lambda_H$  – теплопровідність контрольованого парогазового середовища з номінальною вологістю (нормою);  $\Delta \lambda$  – зміна теплопровідності парогазового середовища при відхиленні від норми.

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

$$K \cdot R_4 - 2 \cdot S \frac{\delta \cdot \Pi}{\lambda_H \cdot F} = 0, \quad (10)$$

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

$$\Delta U_4 = \pm K \cdot R_4 \cdot I \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda_H}. \quad (11)$$

Представляючи значення струму у вигляді  $I = \frac{U_0}{R}$ , остаточно отримують

$$\Delta U_4 = \pm K \cdot U_0 \frac{\Delta \lambda}{\lambda_H}. \quad (12)$$

Оскільки відношення  $\frac{\Delta \lambda}{\lambda_H}$  пропорційне до відхилення вологості від заданого значення, то за різницевою напругою  $\Delta U_4$  і значенням коефіцієнта пропорційності  $K$  можна робити висновок про вологість контрольованого середовища при зміні його температури в широких межах або відхиленнях її від норми.

Викладений метод реалізується у вологомірі при безперервній роботі перемикачів 2 і 3 і, як було показано вище, робочий кінець термопар циклічно то перегрівається відносно контрольованого середовища, то охолоджується. В результаті ТЕРС термопар 6 поряд з постійною складовою, яка пропорційна до температури середовища, містить і змінну складову, залежну, згідно з формулою (1), переважно від коефіцієнта тепловіддачі з поверхні робочого кінця термопар, тобто від теплопровідності середовища, яка визначається вологістю парогазової суміші. ТЕРС термопар 6 через узгоджувальний підсилювач 7 надходить на ширококутовий підсилювач 8, коефіцієнт підсилення якого регулюється сигналами з виходу диференціального підсилювача 13. Далі сигнал після підсилювача 8

порівнюється в диференціальному підсилювачі 9 з частиною падіння напруги від знакозмінного струму на каліброваному резисторі 4. При номінальному значенні вологості подільником напруги 16 встановлюють нуль на виході підсилювача 9. Коли вологість відхиляється від норми, змінна складова ТЕРС термопари 6 змінюється, а падіння напруги на резисторі 4 лишається незмінним. Відхилення напруги підсилюється диференціальним підсилювачем 9 і після випрямлення у фазочутливому випрямлячі 10 і фільтрації у фільтрі 11 реєструється цифровим індикатором 12, що градуований в одиницях відхилення вологості від норми. Цифровий індикатор 19 реєструє зміни температури контрольованого середовища.

Втім, зміна температури контрольованого середовища спричиняє зміну його теплопровідності навіть при сталій вологості, що зумовлює неінформативні зміни амплітуди змінної складової напруги. Автоматична компенсація цих неінформативних змін передбачена в схемі вологоміра зміною коефіцієнта підсилення регульованого підсилювача 8. Для цього постійна складової підсиленої напруги з виходу підсилювача 8 порівнюється у диференціальному підсилювачі 13 з частиною постійної напруги  $U_0$  джерела 1, яка регулюється подільником напруги 14. При температурі градування вологоміра вхідні напруги підсилювача 13 однакові і керуючий сигнал на підсилювач 8 дорівнює нулю. Відхилення цієї температури спричиняє зміни постійної складової ТЕРС, а, отже, і коефіцієнта підсилення, чим вносяться відповідні корективи в підсилення змінної складової і усувається температурна похибка вологоміра.

При неконтрольованих змінах постійного струму, який додатково підігріває і охолоджує робочий кінець термопари, одночасно змінюється і компенсуюча напруга на другому вході диференціального підсилювача 9. Внаслідок цього, коли вологість контрольованої суміші відповідає нормі, забезпечується високостабільний нуль. Завдяки наявності фазочутливого випрямляча 10 відхилення вологості від норми спричиняють пропорційні і різні за знаком покази цифрового індикатора 12, що дає можливість забезпечити допусковий контроль вологості в різних точках середовища, тобто зафіксувати картину поля вологості при різних температурних градієнтах.

Експериментальні дослідження вологоміра показали можливість забезпечення оптимальної підтримки вологості повітряного середовища сушильних камер в діапазоні від 48% до 95% і температурах від 40°C до 150°C з похибкою до 1,0%. Вологомір забезпечує можливість програмного регулювання вологості суміші з урахуванням змін її температури.

*1. Измерения в промышленности. Справочник в трех книгах /Под ред. П. Профоса/ Книга 3. Способы измерения и аппаратура. – М., 1990. 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. Коротков П.А., Лондон Г.Е. Динамические контактные измерения тепловых величин. – Л., 1973.*