

Юрій Скрипник<sup>1</sup>, Геннадій Юрчик<sup>2</sup>, Володимир Курко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну,  
кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій,

<sup>2</sup>Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра електронних засобів і інформаційно-комп'ютерних технологій,

<sup>3</sup>Головний науково-дослідний інститут метрології  
та сертифікації Міносвіти і науки України

## **ВИМІРЮВАЧ ВОЛОГОСТІ РЕЧОВИН ТА МАТЕРІАЛІВ З ПІДГРІВНИМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ**

© Скрипник Юрій, Юрчик Геннадій, Курко Володимир, 2004

**Розглянуто цифровий термоелектричний вимірювач вологості речовин, матеріалів, газових середовищ з алгоритмічним автокоригуванням систематичних похибок результату вимірювання.**

**We have considered digital thermoelectric maesurer of the humidity of substances, materials, gaseos media with algorithmic self-correction of systematical errors of the measurement's result.**

### **Постановка задачі і формулювання цілі статті**

При теплофізичних дослідженнях неоднорідних речовин, матеріалів, аналізуючи склад газових середовищ, виникає необхідність в точному контролі вмісту в них не тільки вологи, але і в оцінці рівномірності розподілу поля вологості. Для вимірювання вологості здійснюють в декількох точках контрольованого об'єму з подальшим обчисленням градієнта поля вологості. Такі задачі виникають при дослідженні розподілу вологи у виробках з багатошарових тканин, в багатошаровій електричній ізоляції, в композиційних матеріалах, а також при аналізі структури харчових продуктів.

Великі габарити існуючих первинних перетворювачів (ПП) вологи не дають змоги виконувати контроль вологи в малих об'ємах, а тим більше в окремих точках простору. Найзручніше в таких випадках застосовувати як чутливий елемент ПП робочий кінець підігрівного термоелектричного перетворювача (ТЕП).

Малі габарити чутливого елемента ТЕП і сполучення в одному елементі не тільки термоприймача, але й і нагрівача, дає змогу контролювати вологість в малих об'ємах та важкодоступних місцях. Нагрівання робочого кінця здійснюють електричним струмом, який пропускають по електроду ТЕП, з використанням термоелектричного ефекту Пельтьє в робочому кінці або ефекту Джоуля в термоелектродах ТЕП [1]. За однакових потужностей нагрівання або охолодження робочого кінця ТЕП величина термоелектрорушійної сили (ТЕРС) на його виході функціонально залежить від тепловіддачі робочого кінця в контрольоване середовище, а, отже, і від вологості цього середовища. Температуру контрольованого середовища визначають за значенням ТЕРС ТЕП за відсутності додаткового нагрівання або охолодження, а вологість визначають при додатковому нагріванні або охолодженні по калібрувальній кривій, яка отримана для вимірної температури [2].

### **Останні дослідження і публікації з проблеми контролю вологості**

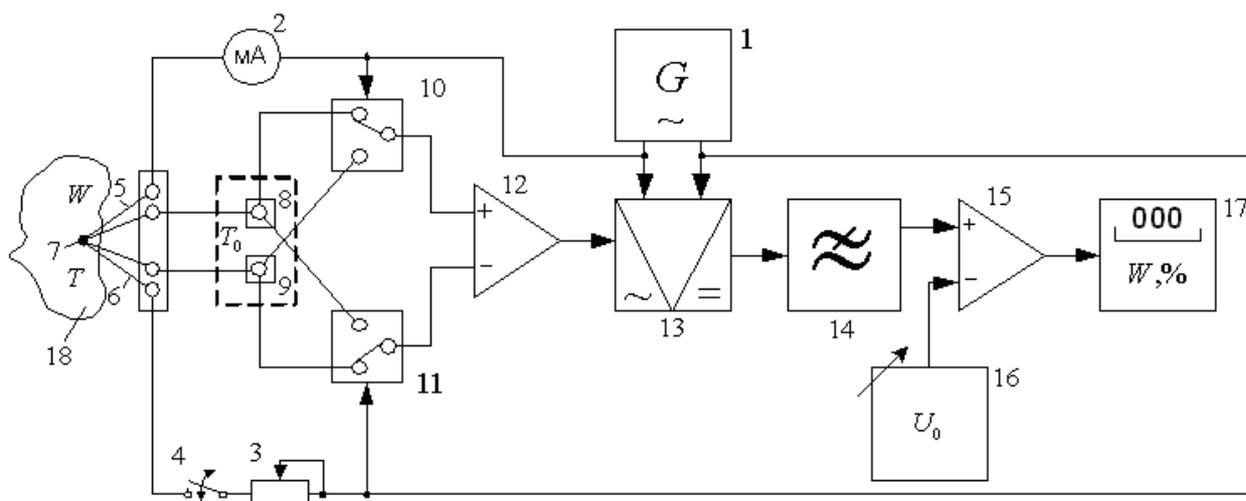
Відомий термоелектричний вологомір [3], в якому для електричної розв'язки ланцюгів нагрівача і термоприймача використовують подвійний ТЕП з двома ідентичними парами термоелектродів і одним спільним робочим кінцем. Недоліком цього вологоміра є те, що із-за кінцевого

значення омичного опору спільного робочого кінця (спаю) електричний струм з ТЕП-нагрівача проникає в ланцюг вимірювального ТЕП, що викликає похибку, зумовлену зміщенням характеристики вимірювального ТЕП додатковою напругою.

Відомий також термоелектричний вологомір [4], який містить два електроди з різних термоелектричних матеріалів, з'єднаних своїми серединами для утворення спільного робочого кінця першого та другого ТЕП, два автоматичні перемикачі, два диференційні підсилювачі, послідовно з'єднані фазочутливий випрямляч і фільтр нижніх частот, цифровий вольтметр. В цьому випадку із-за необхідності почергового нагрівання і охолодження спільного робочого кінця двох ТЕП (за рахунок ефекту Пельтьє) період перемикання напрямку струму через спільний робочий кінець обраний більшим, ніж теплова стала ТЕП, що зумовлює низьку швидкодію вологоміра (частота перемикачів одиниці Гц). Наявність гальванічного зв'язку двох ТЕП через спільний робочий кінець викликає паразитне проходження знакозмінного струму нагрівання-охолодження на вхід першого диференційного підсилювача, що спотворює амплітуду змінної складової напруги, яка пропорційна до вологості контролюваного середовища. Таким чином, відомий термоелектричний вологомір має низьку швидкодію і невисоку точність при точковому контролі вологості і аналізі нерівномірності полів вологості речовин та матеріалів.

### Метод підвищення точності вимірювача вологості

На рисунку показана структурна схема запропонованого цифрового вимірювача вологості речовин та матеріалів з підігрівним ТЕП, який дає можливість усунути недоліки відомих вищезгаданих вимірювачів і досягнути підвищення точності результатів контролю.



Структурна схема вимірювача вологості речовин та матеріалів з підігрівним ТЕП:

- 1 – генератор змінної напруги підвищеної частоти; 2 – міліамперметр; 3 – реостат опору; 4 – перемикач;  
 5, 6 – термоелектроди першого ТЕП; 7 – спільний робочий кінець двох ТЕП; 8, 9 – мідні колодки із вільними кінцями другого ТЕП; 10, 11 – автоматичні перемикачі; 12, 15 – диференційні підсилювачі;  
 13 – фазочутливий випрямляч; 14 – фільтр нижніх частот; 16 – кероване джерело напруги постійного струму; 17 – цифровий вольтметр; 18 – досліджуване середовище (матеріал)

Схема вологоміра містить генератор 1 змінної напруги підвищеної частоти, до парафазних виходів якого через міліамперметр 2, реостат 3 та перемикач 4 під'єднані термоелектроди 5 і 6 подвійного ТЕП. Вільні кінці першого ТЕП підключені до генератора 1, а вільні кінці другого ТЕП з'єднані з мідними колодками 8 і 9. Одна пара однойменних входів автоматичних перемикачів 10 і 11 з'єднана з мідною колодкою 8, друга пара однойменних входів з'єднана з мідною колодкою 9. Виходи автоматичних перемикачів 10 і 11 з'єднані з входами диференціального підсилювача 12, до виходу якого підключені послідовно з'єднані фазочутливий випрямляч 13 і фільтр 14 нижніх

частот. Один вхід диференційного підсилювача 15 з'єднаний з виходом фільтра 14 нижніх частот, другий вхід з'єднаний з керованим джерелом 16 напруги постійного струму. До виходу диференційного підсилювача 15 підключений цифровий вольтметр 17. Керуючі входи автоматичних перемикачів 10 і 11 з'єднані з парафазними виходами генератора 1, а керуючі входи фазочутливого випрямляча 13 з'єднані з обома виходами цього генератора.

Метод вимірювання вологості і принцип дії вологоміра полягають ось у чому. Робочий кінець подвійного ТЕП розташований в одній із точок досліджуваного середовища 18. Через електроди 5 і 6 першого ТЕП і робочий кінець 7 проходить змінний струм від генератора 1 частотою  $f$ . В один напівперіод ( $\Delta t_1 = 1/2f$ ) змінного струму через робочий кінець 7 протікає струм у напрямку, за якого відбувається його охолодження за рахунок поглинання в ньому теплоти Пельтьє. Одночасно з цим, в електродах першого ТЕП і його робочому кінці відбувається виділення теплоти Джоуля, яка зменшує температуру охолодження. З врахуванням цього температура робочого кінця ТЕП, яка визначається температурою  $T$  досліджуваного середовища, знижується до значення

$$T_1 = T - \frac{\Pi I}{\alpha F} + \frac{\kappa_1 R I^2}{\alpha F}, \quad (1)$$

де  $I$  – сила струму через ТЕП;  $\Pi$  – коефіцієнт Пельтьє робочого кінця (спаю) ТЕП;  $R$  – сумарний омичний опір електродів ТЕП і його робочого кінця 7;  $\kappa_1$  – коефіцієнт, який враховує частку теплоти Джоуля, яка поступає з електродів в робочий кінець 7;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі робочого кінця 7, який визначається вологістю досліджуваного середовища;  $F$  – площа поверхні тепловіддачі.

В наступний напівперіод ( $\Delta t_2 = 1/2f$ ) змінного струму, коли напрямок протікання струму змінюється на протилежний, в результаті сумування теплоти Пельтьє і Джоуля температура робочого кінця 7 зростає до значення

$$T_2 = T + \frac{\Pi I}{\alpha F} + \frac{\kappa_1 R I^2}{\alpha F}. \quad (2)$$

Якщо обрати період змінного струму набагато меншим від теплової сталої часу  $\tau$  ТЕП ( $\tau \gg 1/f$ ), то температура робочого кінця матиме значення

$$T_3 = \frac{1}{2\tau} \int_0^\tau (T_1 + T_2) dt = T + \frac{\kappa_1 R I^2}{\alpha F}, \quad (3)$$

тобто визначатиметься тільки тепловою Джоуля.

Як впливає з виразу (3), усталений перегрів робочого кінця 7 відносно температури досліджуваного середовища визначатиметься коефіцієнтом тепловіддачі  $\alpha$ , який залежить від контрольованої вологості.

Для вимірювання вологості здійснюють дві операції. Спочатку перемикач 4 розімкнутий і робочий кінець 7 не підігрівається, оскільки мідні колодки 8 і 9 розташовані за температури  $T_0$  оточуючого середовища, то ТЕРС на виході другого ТЕП дорівнює

$$E_1 = \varepsilon(T - T_0), \quad (4)$$

де  $\varepsilon$  – термоелектричний коефіцієнт ТЕП (коефіцієнт Зеебека).

Автоматичні перемикачі 10 і 11 перемикаються з частотою  $f$  генератора 1 і періодично змінюють полярність ТЕРС (4) відносно входів диференційного підсилювача 12. В результаті цього диференційним підсилювачем 12 підсилюється змінна напруга прямокутної форми

$$U_1(t) = \varepsilon(T - T_0) \text{signSin}2\pi ft, \quad (5)$$

де  $\text{sign sin } 2\pi ft$  – огибаюча знакозмінної напруги.

Підсилена напруга поступає на фазочутливий випрямляч 13, який керується змінною напругою генератора 1. Випрямлена напруга згладжується фільтром 14 низьких частот і через диференційний підсилювач 15 поступає на цифровий вольтметр 17. За відсутності компенсуючої напруги ( $U_0 = 0$ ) на другому вході диференційного підсилювача 15 вимірювана вольтметром напруга має значення

$$U_2 = \varepsilon \kappa_2 \kappa_3 (T - T_0), \quad (6)$$

де  $\kappa_2$  – загальний коефіцієнт підсилення диференційних підсилювачів 12 і 15;  $\kappa_3$  – коефіцієнт випрямлення фазочутливого випрямляча 13 з врахуванням коефіцієнта передачі фільтра 14 нижніх частот.

З виразу 6 видно, що вимірювана напруга пропорційна до температури  $T$  досліджуваного середовища.

Друга операція полягає в замиканні перемикача 4 і додатковому нагріванні робочого кінця 7 ТЕП змінним струмом генератора 1 частоти  $f$ . ТЕРС на виході другого ТЕП набуває значення

$$E_2 = \varepsilon \left[ \left( T + \frac{\kappa_1 R I^2}{\alpha F} \right) - T_0 \right] + IR', \quad (7)$$

де  $R'$  – омичний опір робочого кінця 7.

У виразі (7) другий член являє собою заваду у вигляді падіння напруги на робочому кінці від змінного струму нагрівання:

$$IR' = R' I_m \sin(2\pi ft - \varphi), \quad (8)$$

де  $I_m$  – амплітуда змінного струму нагрівання;  $\varphi$  – фазовий зсув, який зумовлений тепловою інерційністю ТЕП.

Автоматичні перемикачі 10 і 11, які працюють з частотою  $f$ , перетворюють постійну складову напруги (7) в змінну напругу цієї частоти:

$$U_3(t) = \varepsilon \left[ \left( T + \frac{\kappa_1 R I^2}{\alpha F} \right) - T_0 \right] \text{signSin}2\pi ft. \quad (9)$$

Друга складова напруги (7) набуває вигляду

$$R' I_m \sin(2\pi ft - \varphi) \text{sign sin } 2\pi ft = \frac{R' I_m}{2} [\cos \varphi - \cos 2(2\pi ft - \varphi)]. \quad (10)$$

З виразів (9) і (10) видно, що перша і друга складові напруги (7) після комутаційного перетворення з частотою  $f$  опиняються рознесеними по частотах. Інформаційна складова напруги (9) має частоту  $f$ , а завада (10) – подвоєну частоту  $2f$ . Після фазочутливого випрямляча інформаційна складова (9) перетворюється в напругу постійного струму, яка проходить через фільтр нижніх частот 14 і вимірюється вольтметром 17. Напруга завади (10) перетворюється в змінну напругу частоти комутації  $f$  і придушується фільтром 14 нижніх частот. Отже, вимірювана напруга набуває вигляду

$$U_4 = \varepsilon \kappa_2 \kappa_3 \left[ \left( T + \frac{\kappa_1 R I^2}{\alpha F} \right) - T_0 \right]. \quad (11)$$

В кінці першої операції після вимірювання температури  $T$  цифровим вольтметром 17 вихідну напругу диференційного підсилювача 15 компенсують напругою керованого джерела 16. Тому в кінці другої операції вимірювана напруга (11) з врахуванням компенсації в цій напрузі складової (6) матиме значення

$$U_5 = \varepsilon \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \frac{RI^2}{\alpha F}. \quad (12)$$

Для визначення вологості досліджуваного середовища вологомір калібрують. Робочий кінець 7 поміщають в повітряне середовище з 100 % вологістю при заданій температурі  $T$ . Така вологість відповідає точці роси, яку легко проконтролювати. Калібрування вологоміра і вимірювання вологості виконують за однакової потужності перегріву робочого кінця ТЕП, яка встановлюється по міліамперметру 2 за допомогою реостата 3. Водночас фіксується мінімальний показ вольтметра 17

$$U_6 = \varepsilon \kappa_1 \kappa_2 \kappa_3 \frac{RI^2}{\alpha_0 F}, \quad (13)$$

де  $\alpha_0$  – коефіцієнт тепловіддачі робочого кінця 7 при 100 % відносній вологості газового середовища.

Для визначення відносної вологості в досліджуваному середовищі за тієї самої температури  $T$  знаходять відношення напруг (12) і (13)

$$\frac{U_5}{U_6} = \frac{\alpha_0}{\alpha}, \quad (14)$$

звідки коефіцієнт тепловіддачі досліджуваного середовища

$$\alpha = \frac{U_6}{U_5} \alpha_0. \quad (15)$$

Контролюючи вологість, коли діапазон зміни вологості невеликий, можна вважати, що вимірювана вологість є часткою 100 %-ї вологості:

$$W = \frac{U_K}{U} 100 [\%], \quad (16)$$

де  $W$  – вимірювана вологість в %;  $U_K$  – показ вольтметра при калібруванні вологоміра;  $U$  – показ вольтметра при контролі вологості.

Калібрування проводять за різних температур газового, зокрема, повітряного середовища. В процесі контролю вологості спочатку визначають температуру середовища відповідно до (6), а потім у формулу (16) підставляють відповідне значення напруги калібрування  $U_K$  для цієї самої температури. Контролюючи середні і малі вологості, калібрування вологоміра проводять при середніх значеннях вологості відповідних діапазонів.

### Висновки

Як видно з формули (16), на результат вимірювання вологості не впливають параметри ТЕП і параметри вимірювальної схеми, що забезпечує високу точність контролю градієнта поля вологості. Цьому також сприяє придушення завади від проходження струму нагрівання з першого ТЕП до другого за рахунок комутаційного перетворення ТЕРС робочого кінця в напругу змінного струму. Підвищення частоти перетворення до сотень Гц істотно збільшує швидкодію термоелектричного вологоміра.

Дослідження вологоміра з підігрівним подвійним ТЕП градуванням мідь-константан (діаметр електродів 0,5 мм і завдовжки 100 мм), автоматичними перемикачами на основі магнітокерованих контактів (геркони), обмотки керування яких були підключені до генератора змінної напруги частотою 250 Гц, показали, що за струму нагрівання  $I=600$  мА робочий кінець ТЕП перегрівається на  $3-12^{\circ}\text{K}$  залежно від вологості досліджуваного середовища. Загальний коефіцієнт підсилення двох диференційних підсилювачів  $K=400$ , що забезпечило чутливість до температури  $0,03-0,05^{\circ}\text{K}$ , і до відносної вологості  $0,1-0,2\%$ .

1. Коротков П.А., Лондон Г.Е. *Динамические контактные измерения тепловых величин.* – Л., 1974. 2. Патент РФ №2014590, МКН G01 №25/56. *Способ контроля влажности газовых сред и устройство для его осуществления: Патент №2014590 РФ, МКН G01 №25/56 / Скрипник Ю.А., Химичева А.И., Юрчик Г.В., Водотовка В.И. (Україна).* – 4936257; Заявл. 16.05.91; Опубл. 15.06.94. Бюл. №11.