



УКРАЇНА

(19) UA (11) 19249 (13) U  
(51) МПК (2006)  
G01N 27/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) ТЕРМОШУМОВИЙ ВОЛОГОМІР

1

2

(21) u200605503

(22) 19.05.2006

(24) 15.12.2006

(46) 15.12.2006, Бюл. № 12, 2006 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Курко Володимир Романович, Холоденко Вероніка Миколаївна

(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

(57) Термошумовий вологомір, що містить автоматичний перемикач, входи якого через електроди датчика і опорний резистор з'єднано із загальною заземленою шиною, а вихід - з потенціальним входом перетворювача струму в напругу, другий вхід якого з'єднаний із загальною заземленою шиною, а вихід - через смуговий фільтр підключений до високочастотного підсилювача, послідовно

з'єднані вибіркового підсилювач низької частоти, синхронний детектор, фільтр нижніх частот, вольтметр та генератор низької частоти, з'єднаний з керуючими входами автоматичного перемикача і синхронного детектора, який відрізняється тим, що в нього введено додаткові послідовно з'єднані перетворювач струму в напругу, смуговий фільтр та високочастотний підсилювач, які також підключені до виходу автоматичного перемикача відносно загальної заземленої шини, та послідовно з'єднані перемножувач напруг, інтегратор і логарифматор, при цьому входи перемножувача напруг підключено до виходів високочастотних підсилювачів, вихід логарифматора з'єднаний зі входом вибіркового підсилювача низької частоти.

Корисна модель відноситься до області аналізу складу матеріалів та речовин за їхнім електричним опором (електропровідністю) і може бути використана для визначення вологості продуктів харчування, ліків, парфумерних виробів, вибухонебезпечних та вогненебезпечних матеріалів і т.п., без надавання зовнішньої електричної напруги за рівнем власних електричних шумів теплового характеру.

В останній час для оцінки якості ряду матеріалів та речовин, в яких неприпустимим є електроліз та електрохімічний розклад (ліки, гігієнічні матеріали, вогненебезпечні речовини), використовують теплошумові вологоміри [див. Курко В.Р., Скрипник Ю.О., Дубровний В.О. Аналітичний опис роботи теплошумового вологоміра / Вісник КНУТД, №5, 2004, с.54-59]. Електричний сигнал, що несе інформацію про вологість матеріалу, формується з електричних шумів теплового характеру, які є присутніми в будь-якому матеріалі навіть зі слабкою електропровідністю. Знімання інформаційного сигналу здійснюється за допомогою електродних датчиків без прикладання до них зовнішньої напруги або струму.

Але низький рівень теплових шумів та вплив власних шумів електронних вимірювальних схем

не дозволяє достовірно оцінювати вологість низькопровідних матеріалів.

Відомий термошумовий вологомір [див. патент України №62760А, МПК G01N27/02, бюл. №12, 2003р.] який містить кондуктометричний датчик, до електродів якого підключено електричну схему з двома паралельно увімкненими підсилювачами, множувального блоку, фільтрів, автоматичних перемикачів, що керуються від генератора підвищеної частоти через подільник частоти.

Вихідна напруга, яка вимірюється вольтметром, пропорційна опорі датчика і залежить від коефіцієнтів підсилення підсилювачів, масштабно-го коефіцієнту множувального блоку та коефіцієнтів перетворення фільтрів. Так як рівень шумової напруги на виході датчика незначний (порядку долей мікрівольта), то використовуються підсилювачі з великим коефіцієнтом підсилення, немінуча температурна та часова нестабільність цих підсилювачів призводить до нестабільної роботи шумового вологоміра та великих похибок.

Відомий також термошумовий вологомір [див. рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель №a200502201 від 16.01.2006, МПК G01N27/02], що містить автоматичний перемикач, входи якого через електроди датчика і опорний резистор з'єднано зі загальною заземленою ши-

(13) U  
(11) 19249  
(19) UA

ною, а вихід - з потенціальним входом перетворювача струму в напругу, другий вхід якого з'єднаний зі загальною заземленою шиною, а вихід - через смуговий фільтр підключений до високочастотного підсилювача, послідовно з'єднані вибіркового підсилювач низької частоти, синхронний детектор, фільтр нижніх частот, вольтметр та генератор низької частоти, з'єднаний з керуючими входами автоматичного перемикача і синхронного детектора.

Крім того, відомий вологомір включає квадратичний перетворювач напруги з фільтром нижніх частот, підключений до високочастотного підсилювача.

Завдяки періодичному порівнянню електричного шуму електродного датчика з електричним шумом опорного резистора виключається вплив неінформативних шумів сухого матеріалу, що розширяє діапазон вимірювання в ділянці малих вологостей. Але ж нестабільність коефіцієнту високочастотного підсилювача та інших елементів схеми не дозволяє одержати високу точність вимірювання вологості. Крім того, залежність опору (електропровідності) матеріалу від вологості в ділянці середніх та малих вологостей нелінійні, що також призводить до зниження точності термощумового вологоміра.

В основу корисної моделі покладена задача створити такий термощумовий вологомір, в якому введення нових елементів та їх зв'язків забезпечило б виключення впливу нестабільності характеристик підсилювачів та інших елементів схеми на результат перетворення електричного шуму в напругу та дозволило б лінеаризувати залежність цієї напруги від вологості, що підвищить точність вимірювання вологості по тепловим шумам матеріалів в широкому діапазоні значень.

Поставлена задача вирішується тим, що в термощумовий вологомір, який містить автоматичний перемикач, входи якого через електроди датчика і опорний резистор з'єднано зі загальною заземленою шиною, а вихід - з потенціальним входом перетворювача струму в напругу, другий вхід якого з'єднаний зі загальною заземленою шиною, а вихід - через смуговий фільтр підключений до високочастотного підсилювача, послідовно з'єднані вибіркового підсилювач низької частоти, синхронний детектор, фільтр нижніх частот, вольтметр та генератор низької частоти, з'єднаний з керуючими входами автоматичного перемикача і синхронного детектора, згідно з корисною моделлю, в нього введено додаткові послідовно з'єднані перетворювач струму в напругу, смуговий фільтр та високочастотний підсилювач, які також підключені до виходу автоматичного перемикача відносно загальної заземленої шини, та послідовно з'єднані перемножувач напруг, інтегратор і логарифматор, при цьому входи перемножувача напруг підключено до виходів високочастотних підсилювачів, вихід логарифматора з'єднаний зі входом вибіркового підсилювача низької частоти.

Введення в схему термощумового вологоміру додаткових послідовно з'єднаних перетворювача струму в напругу, смугового фільтра, високочастотного підсилювача, а також перемножувача напруг, інтегратора і логарифматора дозволяє автоматично виключити вплив власних шумів

перетворювачів струму в напругу, смугових фільтрів та високочастотних підсилювачів на значення постійної напруги на виході інтегратора, яка пропорційна електропровідності матеріалу, який досліджується, та електропровідності зразкового резистору, а потім логарифмування постійних напруг з виходу інтегратора забезпечує виключення впливу несталості коефіцієнтів перетворення струму в напругу і коефіцієнтів підсилення високочастотних підсилювачів на змінну складову напруги з частотою перемикачання шумових напруг на виході електродного датчика на напругу, яка вимірюється, що підвищує точність виміру вологості досліджуваних матеріалів у широкому діапазоні значень.

На кресленні представлена функціональна схема термощумового вологоміра. Входи автоматичного перемикача 1 через електроди 2 і 3 датчика 4 та опорний резистор 5 з'єднані із загальною заземленою шиною 6. Вихід автоматичного перемикача 1 з'єднано із потенціальними входами перетворювачів струму в напругу 7 і 8, другі входи яких з'єднані також із загальною заземленою шиною 6. До виходів перетворювачів струму в напругу 7 і 8 через смугові фільтри 9 та 10 і високочастотні підсилювачі 11 і 12 підключений входи перемножувач напруг 13. До виходу перемножувача напруг 13 підключено послідовно з'єднані інтегратор 14, логарифматор 15, вибіркового підсилювач 16 низької частоти та синхронний детектор 17. Генератор низької частоти 18 з'єднано з керуючими входами автоматичного перемикача 1 і синхронного детектора 17. До виходу синхронного детектора через фільтр 19 нижніх частот підключено вольтметр 20, градуйований в одиницях вологості. Позицією 21 показано досліджуваний матеріал, з яким контактують електроди 2 і 3 датчика 4, який знаходиться в тепловому контакті з опорним резистором 5.

Термощумовий вологомір працює наступним чином.

За допомогою електродів 2 і 3 з досліджуваного матеріалу 21 знімається шумовий струм, який виникає у вологому матеріалі через теплові флуктуації носіїв струму (електронів, іонів, дірок у напівпровідниках), які знаходяться в тепловій рівновазі з молекулами досліджуваного матеріалу 21. В низькопровідному діелектричному матеріалі з незначними дисипативними втратами тепловий шум обумовлено появою термозбуджених молекул, які поляризуються та створюють елементарні флюктуруючі диполі. В якості поляризованих молекул у вологому діелектричному матеріалі є молекули води.

Середньоквадратичне (дійсне) значення шумового струму електродного датчика 4 згідно з формулою Найквіста

$$i_{\text{шд}} = \sqrt{4kT\Delta fG}, \quad (1)$$

де  $k$  - стала Больцмана;

$T$  - термодинамічна температура досліджуваного матеріалу 21;

$\Delta f$  - смуга пропускання частот смугових фільтрів 9 і 10, в який вимірюється шумовий струм;

$G$  - електропровідність вологого матеріалу між електродами 2 і 3 датчика 4.

Беручи до уваги, що обезводнений матеріал має власну, хоча й невелику, електропровідність  $G_0$ , результуючу електропровідність вологого матеріалу подамо у вигляді суми електропровідностей:

$$G = G_0 + G_B \quad (2)$$

де  $G_B$  - іонна електропровідність води та її розчинів в досліджуваному матеріалі 21.

Шумовий струм (1) надходить через автоматичний перемикач 1 на потенційні низькоомні входи перетворювачів струму в напругу 7 і 8, за допомогою яких перетворюється в дві однакові шумові напруги.

На значення вихідних напруг перетворювачів струму в напругу 7 і 8 у великій мірі впливають їх власні шумові струми, які є того ж порядку, що і шумовий струм датчика 4. Так як власні шуми перетворювачів струму в напругу 7 і 8 та шуми електродного датчика 4 між собою не корельовані, то сумарні вихідні напруги перетворювачів струму в напругу 7 і 8 можемо представити у вигляді:

$$\bar{U}_{ш1} = S_1 \sqrt{4kT\Delta f(G_0 + G_B) + i_{ш1}^{-2}}, \quad (3)$$

$$\bar{U}_{ш2} = S_2 \sqrt{4kT\Delta f(G_0 + G_B) + i_{ш2}^{-2}}, \quad (4)$$

де  $\bar{U}_{ш1}$  та  $\bar{U}_{ш2}$  - середньоквадратичні значення вихідних напруг;

$S_1$  та  $S_2$  - крутизна перетворення струму в напругу;

$i_{ш1}^{-2}$  та  $i_{ш2}^{-2}$  - дисперсії (середній квадрат) власних шумових струмів перетворювачів 7 і 8.

Шумові напруги (3) і (4) проходять крізь смугові фільтри 9 і 10 з смугою  $\Delta f$  на високочастотні підсилювачі 11 і 12. Смугою частот  $\Delta f$  фільтрів 9 і 10 вибирається на ділянці високих частот, щоб відмежувати високочастотні теплові шуми від апаратних низькочастотних шумів високої інтенсивності (фліккер-шуми, контактні шуми, електромагнітні перешкоди і т.п.). Виділені напруги теплових шумів підсилюються високочастотними підсилювачами 11 і 12:

$$\bar{U}_{ш3} = k_1 \sqrt{S_1^2 [4kT\Delta f(G_0 + G_B) + i_{ш1}^{-2}] + \bar{U}_{ш5}^2}, \quad (5)$$

$$\bar{U}_{ш4} = k_2 \sqrt{S_2^2 [4kT\Delta f(G_0 + G_B) + i_{ш2}^{-2}] + \bar{U}_{ш5}^2}, \quad (6)$$

де  $k_1$  та  $k_2$  - коефіцієнти підсилення високочастотних підсилювачів 11 і 12;

$\bar{U}_{ш5}^2$  та  $\bar{U}_{ш6}^2$  - дисперсії власних шумів високочастотних підсилювачів 11 і 12.

Підсилені напруги (5) і (6) перемножуються в перемножувачі напруг 13, а вихідна напруга перемножувача напруг 13 усереднюється інтегратором 14. В результаті перемноження і усереднення корельованих складових шумових напруг утворюється постійна складова напруги, а добуток некорельованих складових напруг наближається до нуля. У напругах (5) і (6) лише перші члени виразів є корельованими, тому що створюються одним джерелом шуму - електродним

датчиком 4. Інші члени відображають шумові струми та шумові напруги незалежних електрон-

них перетворювачів 7 і 8.1 хоча теплові та дробові шуми цих перетворювачів струму в напругу 7 і 8 потрапляють в смугу пропускання фільтрів 9 і 10, їх добуток не дає постійну складову напруги. Тому вихідна постійна напруга інтегратора 14

$$U_7 = S_3 U_{ш3} U_{ш4} = 4k_1 k_2 k_3 S_1 S_2 S_3 kT \Delta f (G_0 + G_B) \quad (7)$$

де  $k_3$  - коефіцієнт передачі інтегратора;

$S_3$  - крутизна перетворення перемножувача напруг 13.

При протилежному положенні автоматичного перемикача 1 до потенційних входів перетворювачів 7 і 8 струму в напругу підключається опорний резистор 5, який знаходиться в тепловому контакті з досліджувальним матеріалом 21. Електропровідність опорного резистора 5 вибирають однаковою з електропровідністю  $G_0$  обезводненого матеріалу. Середньоквадратичне значення шумового струму опорного резистора 5 з урахуванням полоси пропускання  $\Delta f$  смугових фільтрів 9 і 10

$$\bar{i}_{шр} = \sqrt{4kT\Delta f G_0}, \quad (8)$$

Внаслідок перемноження шумових напруг перетворювачів 7 і 8, підсилення цих напруг високочастотними підсилювачами 11 і 12, перемноження їх в перемножувачі напруг 13 і усереднення в інтеграторі 14 формується друга постійна напруга

$$\bar{U}_8 = 4k_1 k_2 k_3 S_1 S_2 S_3 kT \Delta f G_0 \quad (9)$$

Завдяки періодичному перемиканню автоматичного перемикача 1, який керується прямокутною напругою генератора 18 низької частоти, на виході інтегратора 12 постійна напруга періодично змінюється від значення (7) до значення (9). Ці напруги по чергову піддаються нелінійному перетворенню логарифматором 15, створюючи тимчасову послідовність з прологарифмованих напруг:

$$U_9(t) = S_4 \ln \bar{U}_7, \quad 0 < t < \frac{1}{2F}, \quad (10)$$

$$U_{10}(t) = S_4 \ln \bar{U}_8, \quad \frac{1}{2F} < t < \frac{1}{F}, \quad (11)$$

де  $S_4$  - крутизна логарифмічного перетворення;

$F$  - частота переключення шумових струмів.

Завдяки тому, що напруга  $U_9$  вологого матеріалу перевищує напругу  $U_{10}$  сухого матеріалу, в послідовності напруг (10), (11) присутня змінна складова напруги, яка змінюється з частотою перемикання  $F$ :

$$U_{11}(t) = S_4 \frac{\ln \bar{U}_7 - \ln \bar{U}_8}{2} \text{sing} \sin 2\pi Ft, \quad (12)$$

де  $\text{sing} \sin 2\pi Ft$  - прямокутна огинаюча послідовності напруг.

Вибірковим підсилювачем 16 низької частоти, налагодженим на частоту  $F$ , виділяється та підсилюється перша гармоніка змінної напруги (12). Підсилена змінна напруга випрямляється синхронним детектором 17, який керується напругою генератора 18 низької частоти. Випрямлена напруга, згладжена фільтром 19 низьких частот, має вигляд:

$$U_{12} = k_4 k_5 S_4 \frac{\ln \bar{U}_7 - \ln \bar{U}_8}{2} = \frac{1}{2} k_4 k_5 S_4 \ln \frac{\bar{U}_7}{\bar{U}_8}, \quad (13)$$

де  $k_4$  - коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача 16 низької частоти;

$k_5$  - коефіцієнт передачі фільтра 19 нижніх частот.

Підставляючи значення напруг  $\bar{U}_7$  з (7) і  $\bar{U}_8$  з (9), беручи до уваги (2), одержуємо

$$U_{12} = \frac{1}{2} k_4 k_5 S_4 \ln \frac{G}{G_0} \quad (14)$$

Залежність електропровідності  $G$  вологого матеріалу від концентрації води (вологості) нелінійна і апроксимується для дисперсних матеріалів експоненціальною залежністю:

$$G = e^{a+bW} \quad (15)$$

де  $a$  і  $b$  - коефіцієнти, залежні від структури та хімічного складу досліджуваного матеріалу;

$W$  - відносна вологість.

Провідність опорного резистора (16) а 5 можна апроксимувати при  $W=0$  виразом

$$G_0 = e^a \quad (16)$$

Підставляючи вирази (15) і (16) в (14) та, беручи до уваги те, що температура опорного резистора 5 і матеріала 21 однакові, остаточно одержимо:

$$U_{12} = \frac{1}{2} k_4 k_5 S_4 b W = S_0 W, \quad (17)$$

де  $S_0 = \frac{1}{2} k_4 k_5 S_4 b$  - результуюча крутизна перетворення вологості матеріалу в напругу, яка вимірюється.

Як бачимо з формули (17) вихідна напруга термошумового вологоміра пропорційна вологості

і не залежить від крутизни перетворення шумового струму в напругу ( $S_1, S_2$ ), коефіцієнтів підсилення височастотних підсилювачів ( $k_1, k_2$ ), крутизни перетворення перемножувача напруг ( $S_3$ ), коефіцієнта передачі інтегратора ( $k_4$ ), смуги пропускання смугових фільтрів ( $\Delta f$ ) і температури матеріалу, що досліджується ( $T$ ). Чутливість термошумового вологоміра ( $S_0$ ) визначається параметрами низькочастотних перетворювальних елементів, які можна легко стабілізувати.

Таким чином, термошумовий вологомір по запропонованій схемі має високу точність, чутливість та лінійну шкалу в широкому діапазоні вологості, яка вимірюється.

Дослідження показали, що термошумовий вологомір доцільно застосовувати для оцінки вологості матеріалів та речовин, які не повинні підлягати електрохімічному розкладу (ліки, вироби гігієни, парфюмерії, продукти харчування і т. ін.). Діапазон вимірювання починається практично з нуля і досягає 70-80% вологості. Абсолютна похибка вимірювання відносної вологості не перевищує  $\pm 0,05\%$  при невеликих вологостях і 0,5-1,5% при середніх і великих вологостях. Час вимірювання визначається частотою перемикавання шумових струмів (75 Гц), смугою пропускання фільтрів (0,5-1 МГц) і сталою часу вихідного фільтра нижніх частот (1-2 с) і в цілому не перевищує 5-10 с.

