



УКРАЇНА

(19) UA (11) 90924 (13) C2  
(51) МПК (2009)  
G01N 24/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ НАДЛИШКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА ТА ІНШИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

1

2

(21) а200806741

(22) 16.05.2008

(24) 10.06.2010

(46) 10.06.2010, Бюл.№ 11, 2010 р.

(72) КОНДРАТОВ ВЛАДИСЛАВ ТИМОФІЙОВИЧ,  
ЯЦИШЕН ВАДИМ МИХАЙЛОВИЧ

(73) ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМ. В.М.ГЛУШКОВА  
НАН УКРАЇНИ

(56) Куцевол О.М., Поджаренко В.О. Радіочастотні  
методи вимірювання вологості зерна // Автоматика  
та інформаційно-вимірювальна техніка. - 2005.

SU 1453296, 23.01.1996

SU 1718089, 07.03.1992

UA 75700, 15.05.2006

RU 2168719, 10.06.2001

EP 0019154, 26.11.1980

US 3794911, 26.02.1974

(57) 1. Спосіб надлишкових вимірювань вологості зерна та інших сипких матеріалів, оснований на вирівнюванні значень електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості без наявності проб зерна або інших сипких матеріалів при температурі та вологості оточуючого середовища, перетворенні у частоту  $f_{x0}$  електричного сигналу електричної ємності першого або другого сенсора без наявності проб зерна або іншого сипкого матеріалу, вимірюванні та запам'ятовуванні отриманого значення частоти, зміни значень електричних ємностей шляхом введення у перший та другий сенсори вологості проб однорідних та однотипних зернових або інших сипких матеріалів, відповідно, невідомої та відомої за значенням вологості, заданого об'єму та при різних температурах, почерговому перетворенні у частоту електричного сигналу електричної ємності першого та другого сенсорів вологості, вимірюванні частот електричних сигналів, їх запам'ятовуванні з подальшим визначенням вологості досліджуваного зерна або іншого сипкого матеріалу за відомим рівнянням вимірювання, який **відрізняється** тим, що вимірюють та запам'ятовують температуру першого ( $T_{c1}$ ) та другого ( $T_{c2}$ ) сенсорів з пробами зерна або іншого сипкого матеріалу з невідомою та нормованою за значенням вологості, стабілізують температуру другого сенсора до заздалегідь заданого значення, наприклад до  $T_{c2}=T_n=20^\circ\text{C}$ , при якій була здійснена підготовка проби з нормованою за значенням вологості  $W_0$ , у момент часу рівності зазначених

температур при  $\{T_{c2}\}=\{T_n\}$ , вимірюють та запам'ятовують значення частоти  $f_{x2}$  електричного сигналу, після перетворення електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості зерна або інших сипких матеріалів заданого об'єму у частоти  $f_{x1}$  і  $f_{x2}$  та запам'ятовують отримані значення, додатково перетворюють у частоту  $f_{x3}$  електричного сигналу сумарну електричну ємність першого та другого сенсорів вологості, вимірюють та запам'ятовують отримані значення частоти, значення вологості досліджуваної проби зерна або інших сипких матеріалів при температурі оточуючого середовища, тобто при  $T_{c1}=T_{\text{сер}}$ , встановлюють з рівняння надлишкових вимірювань

$$W_x = W_0 \frac{(f_{x3} - f_{x0}) / (f_{x2} - f_{x0}) - f_{x0}^0}{(f_{x3} - f_{x0}) / (f_{x1} - f_{x0}) - f_{x0}^0}, \text{ де}$$

$W_0$  - нормована за значенням вологості,

$f$  - значення частоти відповідно до вимірювань електричної ємності,

після чого визначають дійсне значення вологості досліджуваної проби зерна або інших сипких матеріалів відносно заздалегідь заданого рівня стабілізованої за значенням температури.

2. Спосіб за п.1, який **відрізняється** тим, що одночасно з почерговим перетворенням у частоту електричного сигналу електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості, вимірюванням і запам'ятовуванням частот отриманих електричних сигналів, почергово перетворюють у пропорційні напруги  $U_1$ ,  $U_2$  і  $U_3$  при коефіцієнті підсилення  $K_{n1}$ , та у пропорційні напруги  $U_4$ ,  $U_5$  і  $U_6$  при коефіцієнті підсилення  $K_{n2}$ , відповідно, опір  $R_{c1}$  першого термочутливого елемента, послідовно з'єднані між собою опори першого ( $R_{c1}$ ) термочутливого та третього ( $R_0$ ) термочутливого елементів, опір  $R_0$  третього термочутливого елемента, опір  $R_{c2}$  другого термочутливого елемента, послідовно з'єднані між собою опір  $R_{c2}$  другого термочутливого та опір  $R_0$  термочутливого елементів, вимірюють отримані напруги, які пропорційні, відповідно, температурі  $T_{c1}$  проби першого сенсора з невідомою за значенням вологості, сумарній температурі  $T_{10}$  ( $\{T_{10}\}=\{T_{c1}\}+\{T_0\}$ ), "опорний" за значенням температурі  $T_0$ , температурі другого сенсора з заздалегідь заданою і стабілізованою температурою  $T_n$  та сумарній температурі  $T_{c2}$  ( $\{T_{c2}\}=\{T_{n0}\}=\{T_n\}+\{T_0\}$ ), запам'ятовують отримані

(13) C2

(11) 90924

(19) UA

значення напруг, а про дійсне значення температур обох проб зерна або інших сипких матеріалів судять за рівняннями величин

$$T_{c1} = T_0 \frac{U_2 - U_3}{U_2 - U_1} \text{ при } k_{n1},$$

$$T_{c2} = T_n = T_0 \frac{U_5 - U_6}{U_5 - U_4} \text{ при } k_{n2}, \text{ де}$$

$$U_1 = k_{n1} I_0 R_{c1},$$

$$U_2 = k_{n1} I_0 (R_{c1} + R_0),$$

$$U_3 = k_{n1} I_0 R_0,$$

$$U_4 = k_{n2} I_0 R_{c2},$$

$$U_5 = k_{n2} I_0 (R_{c2} + R_0),$$

$$U_6 = k_{n2} I_0 R_0,$$

$$R_{c1} = S'_1 T_{c1},$$

$$R_{c2} = S'_2 T_{c2},$$

$$R_0 = \text{const} \equiv T_0$$

Винахід відноситься до дієлькометричних методів вимірювання вологості зерна та інших сипких матеріалів і може бути використаний для створення високоточних вимірювачів вологості зерна та сипких матеріалів у сільському господарстві, - на елеваторах, у сховищах зерна, у фермерських господарствах, у будівництві, у хімічній промисловості тощо.

Відомий спосіб вимірювання вологості зерна та інших сипких речовин (А. с. СССР №1453296, кл. G 01 N 27/22, опуб. 27.01.1989г., Бюл. №3 "Изобретения стран мира"), що заснований на додатковому подрібненні досліджуваного матеріалу, вимірюванні електричної ємності порожнього й заповненого пробою зерна первинного перетворювача (сенсора), з подальшим визначенням вологості проби по різниці результатів двох вимірювань.

Недоліком даного способу є додаткові витрати часу на подрібнення матеріалу, що приводить до зниження експресності способу. Крім того, при подрібненні має місце додаткові втрати вологості, що приводить до збільшенню похибки вимірювання.

Відомий спосіб не забезпечує виключення впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів (температури, вологості повітря, тиску тощо) на параметри функції перетворення вимірювального каналу, що приводить до появи додаткових похибок вимірювання.

Механічне зношування первинного перетворювача приводить до зміни його конструктивного параметра, а отже, до зміни крутості перетворення, що, у свою чергу, також збільшує похибку вимірювання. Все це приводить до недостатньої точності вимірювання.

Відомий спосіб вимірювання вологості зерна та інших сипких речовин (А. с. СССР №1718089, G01N27/22. Бюл. №9, 1992), який полягає в тому, що в послідовному колі, яке складається з ємнісного датчика вологості та зразкового елементу, вимірюють значення фазового зсуву між напругами на зразковому елементі та на датчику, а з метою підвищення точності вимірювань додатково вимірюють значення напруги на зразковому елементі.

Відомий спосіб не дозволяє забезпечити високу точність вимірювання вологості зерна та інших сипких матеріалів. Причинами цього є залежність результатів вимірювання від нестабільності функції перетворення вимірювального каналу.

Найбільш близьким за технічною сутністю до запропонованого є спосіб вимірювання вологості зерна та інших сипких речовин (Контроль влажности твердых и сипких материалов /Е.С.Кричевский, А.Г.Волченко, С.С.Галушкин; Под. ред. Е.С.Кричевского. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - С.12-20 (Влагомер "Нива-1")), оснований на вирівнюванні значень електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості без наявності проб зерна чи інших сипких матеріалів при температурі та вологості оточуючого середовища, перетворенні у частоту  $f_{x0}$  електричного сигналу електричної ємності першого чи другого сенсора без наявності проб зерна чи іншого сипкого матеріалу, вимірюванні та запам'ятовуванні отриманого значення частоти, зміни значень електричних ємностей шляхом введення у перший та другий сенсори вологості проб однорідних та однотипних зернових чи інших сипких матеріалів, відповідно, невідомої та відомої за значенням вологості, заданого об'єму та при різних температурах, почерговому перетворенні у частоту електричного сигналу електричної ємності першого та другого сенсорів вологості, вимірюванні частот електричних сигналів, їх запам'ятовуванні з подальшим визначенням вологості досліджуваних зерна чи іншого сипкого матеріалу за відомим рівнянням вимірювання.

Відомий спосіб не забезпечує виключення впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів (температури, вологості повітря, тиску тощо) на параметри генератора, що приводить до появи додаткових похибок вимірювання. Крім того, на результат вимірювання впливають паразитні ємності монтажу та сенсорів, довгострокова нестабільність частоти генератора та чутливість генератора до температури проби. Всі ці недоліки зменшують точність вимірювання вологості зерна чи інших сипких матеріалів.

В основу винаходу покладена задача створення такого способу надлишкових вимірювань вологості зерна та інших сипких матеріалів, у якому, шляхом введення заданої кількості, послідовності та умов виконання операцій забезпечувалося б:

високоточне вимірювання як вологості, так й температури проб;

виключення на результат вимірювання нестабільності функцій перетворення ємності у частоту електричних сигналів та початкового значення частоти генератора;

підвищення точності вимірювання при часовій та температурній нестабільності параметрів функ-

ції перетворення каналу вимірювання температури;

виключення впливу на результат вимірювання зовнішніх дестабілізуючих факторів;

приведення результату вимірювання вологості при тій же температурі, що й температура проби з нормованою за значенням вологістю.

Поставлена технічна задача вирішується завдяки розробки такого способу надлишкових вимірювань вологості зерна та інших сипких матеріалів, який оснований на вирівнюванні значень електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості без наявності проб зерна чи інших сипких матеріалів при температурі та вологості оточуючого середовища, перетворенні у частоту  $f_{x0}$  електричного сигналу електричної ємності першого чи другого сенсорів та запам'ятовуванні отриманого значення частоти, зміни значень електричних ємностей шляхом введення у перший та другий сенсори вологості проб однорідних та однотипних зернових чи інших сипких матеріалів, відповідно, невідомої та відомої за значенням вологості, заданого об'єму та при різних температурах, по черговому перетворенні у частоту електричного сигналу електричної ємності першого та другого сенсорів вологості, вимірюванні частот електричних сигналів, їх запам'ятовуванні з подальшим визначенням вологості досліджуваних зерна чи іншого сипкого матеріалу за відомим рівнянням вимірювання, який від відомих відрізняється тим, що вимірюють та запам'ятовують температуру першого ( $T_{c1}$ ) та другого ( $T_{c2}$ ) сенсорів з пробами зерна чи іншого сипкого матеріалу з невідомою та нормованою за значенням вологістю, стабілізують температуру другого сенсора на заздалегідь заданому рівні, наприклад до  $T_{c2}=T_H=20^\circ\text{C}$ , при якій було здійснено підготовка проби з нормованою за значенням вологістю  $W_0$ , у момент часу рівності зазначених температур, тобто при  $\{T_{c2}\}=\{T_H\}$ , вимірюють та запам'ятовують значення частоти  $f_{x2}$  електричного сигналу, після перетворення електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості зерна чи інших сипких матеріалів заданого об'єму у частоти  $f_{x1}$  і  $f_{x2}$  та запам'ятанні отриманих значень, додатково перетворюють у частоту  $f_{x3}$  електричного сигналу сумарну електричну ємність першого та другого сенсорів вологості, вимірюють та запам'ятовують отримане значення частоти, про значення вологості досліджуваної проби зерна чи інших сипких матеріалів при температурі оточуючого середовища, тобто при  $T_{c1}=T_{\text{сер}}$ , судять за рівнянням надлишкових вимірювань

$$W_x = W_0 \frac{(f_{x3} - f_{x0}) / (f_{x2} - f_{x0}) - f_{x0}^0}{(f_{x3} - f_{x0}) / (f_{x1} - f_{x0}) - f_{x0}^0},$$

а про дійсне значення вологості досліджуваної проби зерна чи інших сипких матеріалів, відносно заздалегідь заданого рівня стабілізованої за значенням температури, судять за електронними таблицями відповідності  $(W_{xT_H} = F(W_x, T_H))$ .

2. Спосіб за п.1, відрізняється тим, що одночасно з по черговим перетворенням у частоту електричного сигналу електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості, вимірюванням і запам'ятовуванням частот отриманих електричних сигналів, по чергово перетворюють у пропорційні напруги  $U_1$ ,  $U_2$  і  $U_3$  при коефіцієнті підсилення  $k_{n1}$ , та у пропорційні напруги  $U_4$ ,  $U_5$  і  $U_6$  при коефіцієнті підсилення  $k_{n2}$ , відповідно, опір  $R_{c1}$  першого термочутливого елементу, послідовно з'єднані між собою опори першого ( $R_{c1}$ ) термочутливого та третього ( $R_0$ ) термонечутливого елементів, опір  $R_0$  третього термонечутливого елементу, опір  $R_{c2}$  другого термочутливого елементу, послідовно з'єднані між собою опір  $R_{c2}$  другого термочутливого та опір  $R_0$  третього термонечутливого елементів, вимірюють отримані напруги, які пропорційні, відповідно, температурі  $T_{c1}$  проби першого сенсора з невідомою за значенням вологістю, сумарній температурі  $T_{10}$  ( $\{T_{10}\}=\{T_{c1}\}+\{T_0\}$ ), "опорний" за значенням температурі  $T_0$ , температурі  $T_{c2}$  другого сенсора, що дорівнює заздалегідь заданій і стабілізованій за значенням температурі ( $\{T_{c2}\}=\{T_H\}$ ) та сумарній температурі  $T_0$ , запам'ятовують отримані значення напруг, а про дійсне значення температур обох проб зерна чи інших сипких матеріалів судять за рівняннями величин

м'ятовуванням частот отриманих електричних сигналів, по чергово перетворюють у пропорційні напруги  $U_1$ ,  $U_2$  і  $U_3$  при коефіцієнті підсилення  $k_{n1}$ , та у пропорційні напруги  $U_4$ ,  $U_5$  і  $U_6$  при коефіцієнті підсилення  $k_{n2}$ , відповідно, опір  $R_{c1}$  першого термочутливого елементу, послідовно з'єднані між собою опори першого ( $R_{c1}$ ) термочутливого та третього ( $R_0$ ) термонечутливого елементів, опір  $R_0$  третього термонечутливого елементу, опір  $R_{c2}$  другого термочутливого елементу, послідовно з'єднані між собою опір  $R_{c2}$  другого термочутливого та опір  $R_0$  третього термонечутливого елементів, вимірюють отримані напруги, які пропорційні, відповідно, температурі  $T_{c1}$  проби першого сенсора з невідомою за значенням вологістю, сумарній температурі  $T_{10}$  ( $\{T_{10}\}=\{T_{c1}\}+\{T_0\}$ ), "опорний" за значенням температурі  $T_0$ , температурі  $T_{c2}$  другого сенсора, що дорівнює заздалегідь заданій і стабілізованій за значенням температурі ( $\{T_{c2}\}=\{T_H\}$ ) та сумарній температурі  $T_0$ , запам'ятовують отримані значення напруг, а про дійсне значення температур обох проб зерна чи інших сипких матеріалів судять за рівняннями величин

температурі  $T_{10}$  ( $\{T_{10}\}=\{T_{c1}\}+\{T_0\}$ ), "опорний" за значенням температурі  $T_0$ , температурі  $T_{c2}$  другого сенсора, що дорівнює заздалегідь заданій і стабілізованій за значенням температурі ( $\{T_{c2}\}=\{T_H\}$ ) та сумарній температурі  $T_0$ , запам'ятовують отримані значення напруг, а про дійсне значення температур обох проб зерна чи інших сипких матеріалів судять за рівняннями величин

$$T_{c1} = T_0 \frac{U_2 - U_3}{U_2 - U_1} \text{ при } k_{n1},$$

$$T_{c2} = T_H = T_0 \frac{U_5 - U_6}{U_5 - U_4} \text{ при } k_{n2},$$

$$\text{де } U_1 = k_{n1} I_0 R_{c1}; U_2 = k_{n1} I_0 (R_{c1} + R_0);$$

$$U_3 = k_{n1} I_0 R_0; U_4 = k_{n2} I_0 R_{c2};$$

$$U_5 = k_{n2} I_0 (R_{c2} + R_0); U_6 = k_{n2} I_0 R_0;$$

$$\text{а } R_{c1} = S_t T_{c1}; R_{c2} = S_t T_{c2}; R_0 = \text{const} \equiv T_0$$

Сутність запропонованого способу вимірювання вологості зерна та інших сипких матеріалів пояснюється структурною схемою вимірювача що наведена на рисунку 1, де 1 - сенсор вологості з пробю зерна чи іншого сипкого матеріалу з невідомою за значенням вологістю; 2 - сенсор вологості з пробю зерна чи іншого сипкого матеріалу з нормованою за значенням вологістю; 3 - конденсатор типу "метелик"; 4 - компенсацийний конденсатор; 5, 6, 7, 8, 9 і 10 - перший, другий, третій, четвертий, п'ятий і шостий автоматичні перемикачі; 11 і 12 - перший та другий термочутливі елементи (терморезистори); 13 - вхідний резистор; 14 - термонечутливий елемент (резистор з нормованим за значенням опором); 15 - додатковий резистор; 16 - підсилювач напруги; 17 - джерело стабільного струму; 18 - цифровий вольтметр; 19 - перетворювач "ємність-частота"; 20 - цифровий частотомір; 21 - блок управління; 22 - термостат.

Сутність запропонованого способу надлишкових вимірювань вологості зерна чи інших сипких матеріалів полягає в наступному.

Відомо, що частота електричних сигналів

$$f_{x1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_x L_k}} = \frac{1}{k\sqrt{C_x}} = \frac{1}{k\sqrt{\epsilon_x S_c / l_c}} = \frac{1}{k\sqrt{\epsilon_x V_c / l_c^2}} = \frac{1}{K\sqrt{\epsilon_x}} \quad (1)$$

де  $L_k$  - індуктивність коливального кола генератора;  $C_x$  - ємність коливального кола;  $\epsilon_x$  - діелектрична

трична проникність проби;  $s_c$  - площа ємнісного сенсора;  $l_c$  - висота ємнісного сенсора чи відстань між електродами, що складають сенсор;  $v_c$  - об'єм проби;  $k$  і  $K$  - коефіцієнти пропорційності  $\epsilon_x = k \sqrt{s_c / l_c}$ , зворотно пропорційна ємності чи діелектричній проникності.

Вологість зерна чи сипкого матеріалу залежить від їх вологовмісту при заданій температурі. Діелектрична проникність зерна чи сипкого матеріалу змінюється від їх вологості. Зерно чи сипучий матеріал заданого об'єму, що розміщений між обкладками конденсатора змінює його ємність. З (1) можна зробити висновок, що діелектрична проникність та ємність пропорційні квадрату частоти:

$$\epsilon_x = 1/K^2 f_x^2, C_x = 1/k^2 f_x^2.$$

Зміна частоти електричних коливань здійснюється за рахунок зміни, зокрема, електричної ємності сенсора. При цьому, основною вимогою перетворення у частоту, наприклад, електричної ємності проби зерна чи іншого сипкого матеріалу є забезпечення постійних значень параметрів  $v_c$  та  $l_c$  (див. (1)). Практично це забезпечується шляхом підготовки проби заданого об'єму та відповідних розмірів, яка розташовується у ємності сенсора вологості.

Запропонований спосіб надлишкових вимірювань вологості зерна та інших сипких матеріалів оснований на перетворенні у частоту  $f_{x0}$  електричного сигналу електричної ємності першого чи другого сенсора без проб зерна чи іншого сипкого матеріалу, вимірюванні та запам'ятовуванні отриманого значення частоти. Причому, до перетворення здійснюється вирівнювання значень електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості без наявності проб зерна чи інших сипких матеріалів при температурі та вологості оточуючого середовища.

Після цього змінюють значення електричних ємностей шляхом введення у перший та другий сенсори вологості проб однорідних та однотипних зернових чи інших сипких матеріалів, відповідно, невідомої та відомої за значенням вологості, заданого об'єму та при різних температурах. Далі по чергово перетворюють у частоту електричного сигналу електричні ємності першого та другого сенсорів вологості, вимірюють частоту електричних сигналів, результати вимірювання запам'ятовувати. Про вологість досліджуваного зерна чи іншого сипкого матеріалу судять за відомим рівнянням вимірювання.

Від відомих запропонований спосіб відрізняється тим, що спочатку вимірюють та запам'ятовують температуру першого ( $T_{c1}$ ) та другого ( $T_{c2}$ ) сенсорів з пробами зерна чи іншого сипкого матеріалу з невідомою та нормованою за значенням вологістю. Це необхідно для того, щоб остаточний результат вимірювання вологості завести до однієї, нормованої за значенням, температури. Дійсно, проба зерна чи іншого сипкого матеріалу може мати різну температуру, а від температури залежить й вологовміст досліджуваного зерна чи іншого сипкого матеріалу.

Температуру другого сенсора стабілізують на заздалегідь заданому рівні, наприклад

$T_{c2} = T_n = 20^\circ\text{C}$ . Це забезпечується за рахунок термостатування чи термостабілізації самого другого сенсора вологості.

Таким чином, згідно з запропонованим способом, спочатку вирівнюють значення електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості без наявності проб зерна чи інших сипких матеріалів при температурі та вологості оточуючого середовища.

Слід зазначити, що визначення частоти  $f_{x0}$  здійснюється для подальшого виключення впливу власної ємності сенсорів вологості на остаточний результат вимірювання вологості зерна чи іншого сипкого матеріалу. Крім того, це необхідно для визначення значення ємності сенсорів без проб з метою підбору та визначення ємності додаткового конденсатора, який підключається до кожного сенсора вологості під час вимірювання частоти їх ємностей.

Далі перетворюють у частоту  $f_{x0}$  електричного сигналу електричну ємність  $C_0$  першого чи другого сенсора без проб зерна чи іншого сипкого матеріалу. Вимірюють та запам'ятовують отримане значення частоти

$$N_{x0} = f_{x0} \Delta t_0 \quad (2)$$

де  $\Delta t_0$  - проміжок часу підрахунку у лічильнику кількості імпульсів, що слідує з частотою  $f_{x0}$ .

Змінюють значення електричних ємностей сенсорів вологості шляхом введення у зазначені сенсори проб однорідних та однотипних зернових чи інших сипких матеріалів, відповідно, невідомої  $W_x$  та відомої  $W_0$  за значенням вологості, заданого об'єму  $v_c$  та при температурах  $T_{c1}$  і  $T_{c2}$ . Тобто у сенсори вологості встановлюють проби досліджуваного зерна чи іншого сипкого матеріалу.

Перетворюють електричні ємності першого та другого сенсорів вологості зерна чи іншого сипкого матеріалу у частоти  $f_{x1}$  і  $f_{x2}$ . Вимірюють та запам'ятовують отримані значення частот:

$$N_{x1} = f_{x1} \Delta t_0 \quad (3)$$

$$N_{x2} = f_{x2}(T_{c2}) \Delta t_0 \quad (4)$$

Змінюють температуру  $T_{c2}$  другого сенсора до заздалегідь заданій і стабілізованій за значенням температурі  $T_n$ , при якій було здійснено підготовка проби з нормованою за значенням вологістю  $W_0$ . У момент часу рівності зазначених температур, тобто при  $\{T_{c2}\} = \{T_n\}$ , вимірюють та запам'ятовують значення частоти  $f_{x2}(T_n) = f_{x2}$  електричного сигналу, при якій урахувалася б й подвійна початкова електрична ємність сенсора вологості:

$$N_{x2} = f_{x2} \Delta t_0 \quad (5)$$

Після цього у частоту  $f_{x3}$  електричного сигналу додатково перетворюють

сумарну електричну ємність першого та другого сенсорів вологості. Вимірюють та запам'ятовують отримане значення частоти

$$N_{x3} = f_{x3} \Delta t_0 \quad (6)$$

при якій урахувалася б й подвійна початкова електрична ємність сенсора вологості.

Про значення вологості досліджуваної проби зерна чи інших сипких матеріалів при температурі оточуючого середовища, тобто при  $\{T_{c1}\} = \{T_{сеп}\}$ , судять за рівнянням числових значень

$$N_{Wx} = W_0 \frac{(N_{x3} - N_{x0})^2 / (N_{x2} - N_{x0})^2 - 1}{(N_{x3} - N_{x0})^2 / (N_{x1} - N_{x0})^2 - 1} \quad (7)$$

що відповідає рівнянню надлишкових вимірювань

$$W_x = W_0 \frac{(N_{x3} - f_{x0})^2 / (N_{x2} - f_{x0})^2 - f_{x0}^0}{(N_{x3} - f_{x0})^2 / (N_{x1} - f_{x0})^2 - f_{x0}^0}$$

Запропонований за п.1 спосіб від відомих від-різняється ще тим, що одночасно з почерговим перетворенням у частоту електричного сигналу електричних ємностей першого та другого сенсорів вологості, вимірюванням і запам'ятовуванням частот отриманих електричних сигналів, почергово перетворюють у пропорційні напруги  $U_1$ ,  $U_2$  і  $U_3$ , - при коефіцієнті підсилення  $k_{n1}$ , у пропорційні напруги  $U_4$ ,  $U_5$  і  $U_6$ , - при коефіцієнті підсилення  $k_{n2}$ , відповідно, опір  $R_{c1}$  першого термочутливого елементу, послідовно з'єднані між собою опори першого ( $R_{c1}$ ) термочутливого та третього ( $R_0$ ) термонечутливого елементів, опір  $R_0$  третього термонечутливого елементу (резистора), опір  $R_{c2}$  другого термочутливого елементу, послідовно з'єднані між собою опір  $R_{c2}$  другого термочутливого та опір  $R_0$  термонечутливого елементів.

Слід зазначити, що вимірювання температури першого і другого сенсорів здійснюється першим та другим термочутливими елементами (терморезисторами), які мають лінійну залежність опору від температури, але різну чутливість, тобто  $R_{c1} = S_1 T_{c1}$ , а  $R_{c2} = S_2 T_{c2}$ , де  $S_1$  - крутість перетворення температури  $T_{c1}$ , у опір для першого термочутливого елементу;  $S_2$  - крутість перетворення температури  $T_{c2}$  у опір для другого термочутливого елементу. Тому, для виключення впливу різних значень чутливості чи крутості перетворення на результати вимірювання температури, у пропорційні напруги  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  і  $U_4$ ,  $U_5$ ,  $U_6$  перетворюють опори двох термочутливих та одного термонечутливого елементів при коефіцієнтах підсилення  $k_{n1}$  і  $k_{n2}$  відповідно.

Спочатку, при у напругу

$$U_1 = k_{n1} I_0 (R_{c1} + r_0) \quad (8)$$

де  $I_0$  - стабільний за значенням струм через електричне коло, в якому термочутливий елемент з опором  $R_{c1}$  пропорційний температурі  $T_{c1}$  першого сенсора вологості;  $k_{n1}$  - коефіцієнт підсилення падіння напруги на опорі  $R_{c1}$ ;  $r_0$  - неінформативний опір кола (опір з'єднувальних провідників тощо), перетворюють опір першого ( $R_{c1}$ ) термочутливого елементу та неінформативний опір  $r_0$  частотозадаючого електричного кола. Отриману напругу (8) вимірюють та запам'ятовують.

Після цього у напругу

$$U_2 = k_{n1} I_0 (R_{c1} + R_0 + r_0) \quad (9)$$

перетворюють опори  $R_{c1}$  і  $R_0$  ( $\{R_0\} = \text{const} \equiv \{T_0\}$ ) термочутливого та термонечутливого елементів та неінформативний опір  $r_0$  електричного кола.

Далі у напругу

$$U_3 = k_{n1} I_0 (R_0 + r_0) \quad (10)$$

перетворюють опір  $R_0$  термонечутливого елементу та неінформативний опір  $r_0$  електричного кола.

Отримані напруги  $U_1$  (8),  $U_2$  (9) і  $U_3$  (10) пропорційні, відповідно, температурі  $T_{c1}$  проби першого сенсора з невідомою за значенням вологістю, сумарній температурі  $T_{10}$  ( $\{T_{10}\} = \{T_{c1}\} + \{T_0\}$ ) та "опорний" за значенням температурі  $T_0$ .

За результатами проміжних вимірювань опорів судять про дійсне значення температури проби зерна чи іншого сипкого матеріалу з невідомою за значенням вологістю за рівнянням величин

$$T_{c1} = T_0 \frac{U_2 - U_3}{U_2 - U_1} \quad (11)$$

Далі, згідно з запропонованим способом, вимірюють температуру другого сенсора вологості з нормованою за значенням вологістю пробкою. У напругу

$$U_4 = k_{n2} I_0 (R_{c2} + r_0) \quad (12)$$

де  $I_0$  - стабільний за значенням струм через електричне коло, в якому термочутливий елемент з опором  $R_{c1}$  пропорційний температурі  $T_{c1}$  першого сенсора вологості;  $k_{n2}$  - коефіцієнт підсилення падіння напруги на опорі  $R_{c2}$ , перетворюють опір другого ( $R_{c2}$ ) термочутливого елементу та неінформативний опір  $r_0$  частотозадаючого кола. Отриману напругу (12) вимірюють та запам'ятовують.

Далі у напругу

$$U_5 = k_{n2} I_0 (R_{c2} + R_0 + r_0) \quad (13)$$

перетворюють опори  $R_{c2}$  і  $R_0$  термочутливого та термонечутливого елементів та неінформативний опір  $r_0$  кола. Після цього у напругу

$$U_6 = k_{n2} I_0 (R_0 + r_0) \quad (14)$$

перетворюють опір  $R_0$  термонечутливого елементу та неінформативний опір  $r_0$  електричного кола.

Отримані напруги  $U_4$  (12),  $U_5$  (13) і  $U_6$  (14) пропорційні, відповідно, температурі  $T_{c2}$  проби першого сенсора з відомою і нормованою за значенням вологістю, сумарній температурі  $T_{20}$  ( $\{T_{20}\} = \{T_{c2}\} + \{T_0\}$ ) та "опорний" за значенням температурі  $T_0$ .

За результатами проміжних вимірювань опорів судять про дійсне значення температури проби зерна чи іншого сипкого матеріалу з відомою за значенням вологістю за рівнянням величин

$$T_{c2} = T_0 \frac{U_5 - U_6}{U_5 - U_4} \quad (15)$$

Про дійсне значення вологості досліджуваної проби зерна чи інших сипких матеріалів відносно стабілізованої за значенням температурі (15), при якій виготовлялась проба зерна чи інших сипких матеріалів, судять за електронними таблицями відповідності  $(N_{xT_0} = F(N_x, T_0))$

Як видно з отриманих аналітичних виразів (7), (11) і (15), при виконанні операції віднімання зменшуються чи виключаються адитивні складові похибки вимірювання. При виконанні операції ділення зменшуються чи зовсім виключаються мультиплікативні складові похибки визначення вологості проб зерна чи іншого сипкого матеріалу та їх температур.

Таким чином, запропонований спосіб надлишкових вимірювань вологості зерна чи інших сипких

матеріалів забезпечує підвищення точності вимірювання.

На рисунку наведена функціональна схема цифрового вимірювача вологості, що пояснює сутність зазначеного способу вимірювання.

Робота даного діелькометричного вимірювача вологості сипких речовин реалізована наступним чином, і складається з трьох тактів вимірювання і четвертого такту обробки результатів.

Після ввімкнення живлення всі функціональні блоки встановлюються в вихідний стан. Автоматичні перемикачі 5, 6, 7, 8, 9 і 10 встановлюються у положення, показане на рисунку. Відлікові пристрої цифрового вольтметра 18 і цифрового частотоміра 20 показують нулі.

Слід зазначити, що сенсори 1 чи 2 з електричною ємністю  $C_e$  до частото задаючого кола генератора 19 підключаються по чергово за допомогою автоматичного перемикача 5. За допомогою автоматичного перемикача 7 до цього кола додатково підключається ще й електрична ємність 4, яка вибирається рівною за значенням ємності сенсора вологості, тобто  $C_e$ .

Спочатку здійснюється вирівнювання електричних ємностей сенсорів 1 і 2 без наявності проб шляхом повороту ручки (ротора) рухомого електроду конденсатора 3 (типу "метелик") (див. рисунок). Для цього, по команді з блоку управління 21, по чергово змінюють положення автоматичного перемикача 5 і контролюють частоту електричного сигналу генератора 19 за допомогою цифрового частотоміра 20. У момент часу досягнення однакових показань цифрового частотоміра фіксують положення ротора конденсатора 3 і фіксують (запам'ятовують) значення (2) частоти  $f_{x0}$  вихідного сигналу генератора 19.

Після цього у ємності сенсорів 1 і 2 встановлюють проби зерна чи іншого сипкого матеріалу з невідомою та відомою за значенням вологості та температурою. У сенсорі вологості 1 встановлюється температура оточуючого середовища, тобто  $\{T_{c1}\} = \{T_{сер}\}$ . По команді з блоку управління 21 за допомогою термостату 22 температуру сенсора 2 з пробю, що має нормовану за значенням вологості, встановлюють рівною температурі створення цієї проби і встановлення нормованої за значенням вологості, тобто  $\{T_{c2}\} = \{T_H\}$ . Контроль за температурою першого та другого сенсорів 1 і 2 здійснюється за допомогою першого та другого термочутливих елементів (резисторів 11 і 12). За допомогою термочутливих елементів 11 і 12 температура сенсорів 1 і 2 перетворюється у відповідні напруги. Останні вимірюються за допомогою цифрового вольтметра 18. Про дійсні значення температури судять за рівнянням вимірювань 8 і 9.

Після встановлення заданої температури всередині термостату 2 з сенсором 2 і термочутливим резистором 12, по чергово підключають сенсори вологості 1 і 2 різної температури до генератора 19. Оскільки вихід генератора 19 підключений до цифрового частотоміра 20, то за допомогою останнього здійснюється вимірювання частоти вихідного електричного сигналу генератора 19 при різних положеннях автоматичних перемикачів 5, 6

і 7. Це обумовлено реалізованим методом надлишкових вимірювань.

У першому такті вимірюється частота  $f_{x1}$  електричного сигналу генератора 19, який формується при підключенні до нього сенсора 1 вологості за допомогою автоматичного перемикачів 5 і 7 (при їх положеннях, що показані на рисунку). Результат (3) вимірювання зазначеної частоти запам'ятовується.

У другому такті вимірюється частота  $f_{x2}$  електричного сигналу генератора 19, який формується при підключенні до нього сенсора 2 вологості. Це здійснюється по команді з блоку управління 21 шляхом зміни положення автоматичного перемикача 5 на протилежне. Результат (5) вимірювання зазначеної частоти також запам'ятовується.

У третьому такті вимірюється частота  $f_{x3}$  електричного сигналу генератора 19, який формується при підключенні до нього першого і другого сенсорів 1 і 2 вологості. Це здійснюється по команді з блоку управління 21 шляхом встановлення автоматичного перемикача 5 у положення, що протилежне показаному на рисунку, а автоматичного перемикача 6 - на протилежне показаному на рисунку. Результат (6) вимірювання зазначеної частоти запам'ятовується.

В четвертому такті відбувається обробка результатів проміжних вимірювань отриманих значень частот електричних сигналів генератора 19 згідно з рівнянням числових значень (7). В результаті отримують дійсне значення вологості проби зерна чи іншого сипкого матеріалу.

Одночасно з вимірюванням частоти здійснюється вимірювання температури сенсорів 1 і 2 методом надлишкових вимірювань. Причому за час вимірювання дійсного значення вологості проби зерна чи іншого сипкого матеріалу, що дорівнює одному циклу вимірювань, здійснюється вимірювання опорів двох термочутливих і одного термоне чутливого елементів (резисторів 11, 12 і 13) при різних значення коефіцієнту  $k_n$  підсилення підсилювача 16 напруги, з наступним визначенням, за результатами вимірювань опорів, температури обох сенсорів вологості. Для перемикання термочутливих і термоне чутливих елементів використовуються автоматичні перемикачі 8, 9 і 10.

Спочатку, у першому такті вимірювання температури сенсорю 1, по команді з блоку управління 21, автоматичні перемикачі 8, 9 і 10 встановлюються у положення, що показане на рисунку. В результаті через послідовно з'єднані між собою опори додаткового резистору 15, замкнутого автоматичного перемикача 9, термочутливого елементу 11, що розміщений у сенсорі 1 вологості, автоматичних перемикачів 8 і 10 потече стабілізований за значенням струм від джерела 17 стабільного струму. В результаті на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів термочутливого елементу 11, замкнених автоматичних перемикачів 8, 9 і 10 та з'єднувальних провідників, здійснюється падіння напруги, яка, за допомогою підсилювача 16, підсилюється у задане число  $k_{n1}$  разів. Отримана напруга  $U_1$  (8), що містить інформацію про температуру  $T_{c1}$  проби пер-

шого сенсора, вимірюється за допомогою цифрового вольтметра 18 та запам'ятовується.

У другому такті вимірювання, по команді з блоку управління 21, автоматичний перемикач 8 встановлюється у положення, що протилежне показаному на рисунку. В результаті струм потече через послідовно з'єднані між собою опори додаткового резистору 15, замкнених автоматичних перемикачів 8, 9 і 10, а також термочутливого елементу 11. На вхід підсилювача 16 поступить напруга, що отримана за рахунок падіння струму на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів термочутливого елементу 11, замкнених автоматичних перемикачів 8, 9 і 10 та з'єднувальних провідників. Зазначена напруга за допомогою підсилювача 16, підсилюється у  $k_{n1}$  раз. Отримана напруга  $U_2$  (9), що містить інформацію про сумарну температуру  $T_{10}$  ( $\{T_{10}\}=\{T_{c1}\}+\{T_0\}$ ), що дорівнює сумі температур  $T_{c1}$  проби першого сенсора 1 і температурі  $T_0$  термочутливого елементу (резистора) 14, вимірюється за допомогою цифрового вольтметра 18 та запам'ятовується.

У третьому такті вимірювання, по команді з блоку управління 21, автоматичні перемикачі 8 і 9 встановлюються у положення, протилежне показаному на рисунку. В результаті через опор термочутливого елементу 14 та опорі замкнених автоматичних перемикачів 8, 9 і 10 та з'єднувальних провідників потече стабілізований за значенням струм від джерела 17 стабільного струму. В результаті на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів термочутливого елементу 14, замкнених автоматичних перемикачів 8, 9 і 10 та з'єднувальних провідників, здійснюється падіння напруги, яка за допомогою підсилювача 16 також підсилюється у задане число  $k_{n1}$  разів. Отримана напруга  $U_3$  (10), що містить інформацію про опорну за значенням температуру  $T_0$ , вимірюється за допомогою цифрового вольтметра 18 та запам'ятовується.

Про дійсне значення температури  $T_{c1}$  проби у сенсорі 1 з судять за рівнянням надлишкових вимірювань (11).

Аналогічно визначається температура  $T_{c2}$  сенсора з нормованою за значенням вологості пробою. Оскільки чутливості лінійного перетворення температури у опір неідентичні за значенням, тобто  $R_{c1}=S_1 T_{c1}$ , а  $R_{c2}=S_2 T_{c2}$ , то визначення температури  $T_{c2}$  здійснюється при значенні коефіцієнта підсилення підсилювача 16 рівному  $k_{n2}$ . Причому значення коефіцієнту  $k_{n2}$  вибирається таким, щоб напруги, що вимірюються за допомогою цифрового вольтметра 18, тобто

$$\begin{aligned} \text{де } U_1 &= k_{n1} I_0 (R_{c1} + r_0) \approx k_{n1} I_0 (S_1 T_{c1} + r_0) \approx \\ &= k_{n1} S_1 I_0 (T_{c1} + \Delta T_0) \approx S_1 I_0 (T_{c1} + \Delta T_0) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} U_4 &= k_{n2} I_0 (R_{c2} + r_0) \approx k_{n2} I_0 (S_2 T_{c2} + r_0) \approx \\ &= k_{n2} S_2 I_0 (T_{c2} + \Delta T_0) \approx S_2 I_0 (T_{c2} + \Delta T_0) \end{aligned} \quad (17)$$

мали однакову чутливість до вимірювальних температур, тобто, щоб  $k_{n1} S_1 = k_{n2} S_2 = S$

У першому такті вимірювання температури сенсора 2, по команді з блоку управління 21, автоматичні перемикачі 9 і 10 встановлюються у положення, протилежні показаному на рисунку. В результаті через послідовно з'єднані між собою опори додаткового резистору 15, замкненого (у іншому стані, ніж показано на рисунку) автоматичного перемикача 9, термочутливого елементу 12, що розміщений у сенсорі 2 вологості, автоматичного перемикача 8 (і іншому стані) та з'єднувальних провідників потече стабілізований за значенням струм від джерела 17 стабільного струму. В результаті на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів термочутливого елементу 12, замкнених автоматичних перемикачів 8, 9 і 10 та з'єднувальних провідників, здійснюється падіння напруги, яка, за допомогою підсилювача 16, підсилюється у  $k_{n2}$  рази. Отримана напруга  $U_4$  (12),

що містить інформацію про температуру  $T_{c2}$  проби першого сенсора, вимірюється за допомогою цифрового вольтметра 18 та запам'ятовується.

У другому такті вимірювання, по команді з блоку управління 21, автоматичний перемикач 8 також встановлюється у положення, протилежне показаному на рисунку. В результаті струм вже потече через послідовно з'єднані між собою опори додаткового резистору 15, замкненого автоматичного перемикача 9 (що знаходиться у протилежному стані, ніж показано на рисунку), термочутливого елементу 12, автоматичних перемикачів 10 і 8 та з'єднувальних провідників.

На вхід підсилювача 16 поступить напруга, що отримана за рахунок падіння струму на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів термочутливого елементу 12, термочутливого елементу 14, замкнених автоматичних перемикачів 8, 9 і 10 та з'єднувальних провідників. Зазначена напруга за допомогою підсилювача 16, підсилюється у  $k_{n2}$  рази. Отримана напруга  $U_5$  (13), що містить інформацію про сумарну температуру  $T_{20}$  ( $\{T_{20}\}=\{T_{c2}\}+\{T_0\}$ ), що дорівнює сумі температур  $T_{c2}$  проби першого сенсора 1 і температури  $T_0$  термочутливого елементу (резистора) 14, вимірюється за допомогою цифрового вольтметра 18 та запам'ятовується.

У третьому такті вимірювання, по команді з блоку управління 21, автоматичний перемикач 10 встановлюється у положення, показане на рисунку. В результаті через послідовно з'єднані між собою опори додаткового резистору 15, замкнених автоматичних перемикачів 8, 9 і 10, з'єднувальних провідників та термочутливого елементу 14 потече стабілізований за значенням струм від джерела 17 стабільного струму. В результаті на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів термочутливого елементу 14, замкнених автоматичних перемикачів 8, 9 і 10 та з'єднувальних провідників, здійснюється падіння напруги, яка, за допомогою підсилювача 16 також підсилюється у задане число  $k_{a1}$  разів. Отримана напруга  $U_6$  (14), що містить інформацію про опорну за значенням температуру  $T_0$ , вимірюється за допомо-

гою цифрового вольтметра 18 та запам'ятовується.

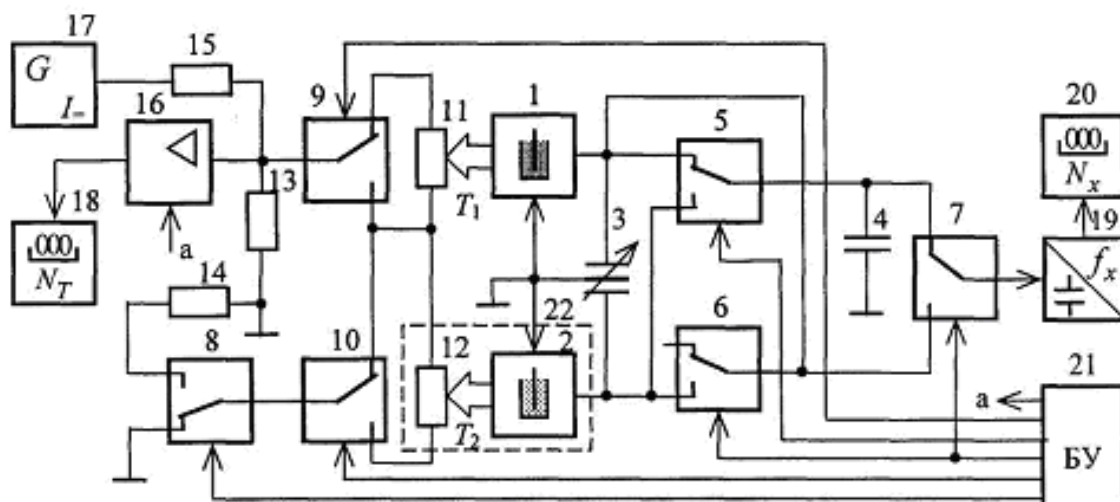
Про дійсне значення температури  $T_{c2}$  проби у сенсори 2 з судять за рівнянням надлишкових вимірювань (15).

За отриманими значеннями температур  $T_{c1}$  і  $T_{c2}$  ( $\{T_{c2}\}=\{T_n\}$ ) корегують значення вологості  $W_x$  зерна чи іншого сипкого матеріалу за електронними таблицями відповідності  $N_{xT_n} = F(N_x, T_n)$ .

Тобто значення вологості досліджуваної проби зерна чи інших сипких матеріалів, отримане при температурі оточуючого середовища  $T_{сер}$  ( $\{T_{сер}\}=\{T_{c1}\}$ ), приводиться до значення, що відповідає температурі  $T_n$  підготовки проби з нормованою за значенням вологістю  $W_0$ .

Таким чином, запропонований спосіб надлишкових вимірювань вологості зерна чи інших сипких

матеріалів забезпечує вирішення поставленої технічної задачі, тобто забезпечує високоточне вимірювання як вологості, так й температури проб, виключення на результат вимірювання нестабільності функцій перетворення ємності у частоту електричних сигналів та початкового значення частоти генератора, підвищення точності вимірювання температури при часовій та температурній нестабільності параметрів функції перетворення каналу вимірювання температури, виключення впливу на результат вимірювання зовнішніх дестабілізуючих факторів, опорів автоматичних перемикачів та з'єднувальних провідників, приведення результату вимірювання вологості при тій же температурі, що й температура проби з нормованою за значенням вологістю.



**Функціональна схема цифрового вимірювача  
вологості зерна та інших сипучих речовин**

Рис.