



УКРАЇНА

(19) UA (11) 91245 (13) C2
(51) МПК (2009)
G01N 24/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) ЦИФРОВИЙ ВИМІРЮВАЧ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА ТА ІНШИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

1

(21) a200807134

(22) 22.05.2008

(24) 12.07.2010

(46) 12.07.2010, Бюл.№ 13, 2010 р.

(72) КОНДРАТОВ ВЛАДИСЛАВ ТИМОФІЙОВИЧ

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

(56) UA 259, 25.12.1998

SU 1744626, 30.06.1992

SU 1620924, 15.01.1991

RU 2130606, 20.05.1999

US 3761810, 25.09.1973

WO 8303139, 15.09.1983

DE 2719039, 17.08.1978

(57) Цифровий вимірювач вологості зерна та інших сипких матеріалів, що містить послідовно з'єднані генератор електричних сигналів, формувач імпульсів та лічильник імпульсів, а також послідовно з'єднані джерело стабільного струму, перший резистор, підсилювач та аналого-цифровий перетворювач, другий резистор, що підключений між входом підсилювача та земляною шиною, перший сенсор температури, перший та другий ємнісні сенсори вологості, входи яких об'єднані та з'єднані з земляною шиною, виходи першого та другого сенсорів вологості з'єднані через послідовно включені конденсатор та варикап, об'єднані різноіменні входи конденсатора та варикапа підключені до виходу першого цифро-аналогового перетворювача, мікроконтролер, входи-виходи порту "С" якого через загальну шину з'єднані з входами першого цифро-аналогового перетворювача, цифрового відлікового пристрою і клавіатури, входи-виходи порту "В" мікроконтролера підключені до виходів аналого-цифрового перетворювача, входи-виходи порту "D" з'єднані з виходами та входами керування лічильника імпульсів, який відрізняється тим, що додатково містить резистивний нагрівач термостата, другий цифро-аналоговий перетворювач, другий сенсор температури, третій ємнісний сенсор вологості без проби, третій стабільний і нормований за значенням опору резистор, перший, другий, третій, четвертий, п'ятий і шостий

2

автоматичні перемикачі, перший вхід першого автоматичного перемикача з'єднаний з об'єднаними між собою виходом другого і другим входом третього автоматичних перемикачів і підключений до виходу першого ємнісного сенсора вологості, другий вхід першого автоматичного перемикача з'єднаний з другим входом другого автоматичного перемикача і підключений до виходу другого ємнісного сенсора вологості, вихід першого автоматичного перемикача з'єднаний з виходом третього ємнісного сенсора вологості, вхід якого підключений до земляної шини, та з'єднаний з першим входом третього автоматичного перемикача, вхід керування першого автоматичного перемикача підключений до виходу другого розряду порту "А" мікроконтролера, вихід третього розряду порту "А" якого підключений до з'єднаних між собою входів керування другого і третього автоматичних перемикачів, вихід четвертого розряду порту "А" з'єднаний з входом керування четвертого автоматичного перемикача, вихід якого підключений через перший резистор до джерела стабільного струму, а через другий резистор - до земляної шини та, безпосередньо, до входу підсилювача, перший та другий входи четвертого і п'ятого автоматичних перемикачів підключені, відповідно, до першого та другого сенсорів температури, причому другий вхід четвертого і перший вхід п'ятого автоматичних перемикачів з'єднані між собою і з об'єднаними різноіменними входами сенсорів температури, вхід керування п'ятого автоматичного перемикача підключений до виходу шостого розряду порту "А" мікроконтролера, п'ятий розряд порту "А" якого з'єднаний зі входом керування шостого автоматичного перемикача, перший вихід якого через третій резистор, а його другий вихід безпосередньо, підключені до земляної шини, вхід шостого автоматичного перемикача з'єднаний з виходом п'ятого автоматичного перемикача, при цьому один кінець резистивного нагрівача термостата підключений до земляної шини, а другий - до виходу другого цифро-аналогового перетворювача.

Вінахід відноситься до вологометрії зерна та інших сипких матеріалів і може бути використаний

у будівництві, у агропромисловому комплексі, - на елеваторах, у сховищах зерна, у фермерських

(13) C2
(11) 91245
(19) UA

господарствах, тощо.

Відомий цифровий вимірювач вологості зерна та інших сипких матеріалів (Патент України №259. М. кл. G01N 21/22. Бюл. №6, 25.12.98р.), який містить стабілізоване джерело живлення, детектор, фільтр, блок перетворювачів, стабільний генератор високої частоти, виходом з'єднаний зі входом коливального контуру, вихід якого з'єднаний з входом детектора, який, в свою чергу, своїм виходом з'єднаний з входом фільтра, вихід якого підключений до першого входу блоку перетворювачів.

Відомий вимірювач не дозволяє забезпечити високу точність вимірювання вологості зерна та інших сипких матеріалів. Причинами цього є залежність результатів вимірювання від довгострокової нестабільності параметрів коливального контуру та функції перетворення вимірювального каналу, яка обумовлена дією зовнішніх дестабілізуючих факторів (температури, тиску, вологості тощо). Крім того, відомий вимірювач не забезпечує виключення систематичних похибок, що обумовлені старінням елементів вимірювача.

Відомий цифровий вимірювач вологості зерна та інших сипких матеріалів (див. Контроль влажности твердых и сыпких материалов / Е.С. Кричевский, А.Г. Волченко, С.С. Галушкин; Под. ред. Е.С. Кричевского. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - С.8-10 (Вологометрична система „ВСКМ-12")), що складається з ємнісного компланарного датчика, пасивний електричний контур, що містить індуктивність та ємність, два варикапи та термокомпенсаційний конденсатор, з два резистори, тунельний діод, вимірювальний генератор, підсилювач, демодулятор, фазочутливий комутатор, інтегратор, підсилювач-обмежувач, змішувач частот, подільник частоти, реверсивний лічильник, дешифратор, часозадаючий блок, перший та другий перемикачі, блок індикації, що з'єднані певним чином.

Відомому вимірювачу притаманна недостатня точність вимірювання, що обумовлена наявністю не виключених та додаткових систематичних похибок вимірювання. Останні обумовлені чутливістю функції перетворення вимірювального каналу до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів, впливом процесу старіння елементів та матеріалу на точність вимірювання вологості.

Найбільш близьким за технічною сутністю до запропонованого є цифровий вимірювач вологості зерна та інших сипких матеріалів (Контроль влажности твердых и сыпких материалов / Е.С. Кричевский, А.Г. Волченко, С.С. Галушкин; Под. ред. Е.С. Кричевского. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - С.12-20 (Влагомер „Нива-1")), що містить послідовно з'єднані між собою генератор електричних сигналів, формувач імпульсів і лічильник імпульсів, послідовно з'єднані між собою джерело стабільного струму, перший резистор, підсилювач та аналого-цифровий перетворювач, другий резистор, що підключений між входом підсилювача та земляною шиною, перший сенсор температури, перший та другий ємнісні сенсори вологості, входи яких об'єднані між собою і з земляною шиною, виходи першого та другого сенсорів вологості з'єднані між собою через послідовно включені конденсатор та варикап, об'єднані різнойменні входи конденсато-

ра та варикапа підключені до виходу першого цифроаналогового перетворювача, мікроконтролер, входи-виходи порту „С” якого через загальну шину з'єднані з виходами першого цифроаналогового перетворювача, цифрового відлікового пристрою і клавіатури, входи-виходи порту „В” мікроконтролера підключені до виходів аналого-цифрового перетворювача, входи-виходи порту „D” з'єднані з виходами та входами управління лічильника імпульсів.

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 цифрового вимірювача вологості зерна та інших сипких матеріалів з автоматичною корекцією похибок, тобто вимірювача, у якому, шляхом введення заданої кількості функціональних блоків і елементів та їх зв'язків між собою та з іншими функціональними блоками вимірювача забезпечувалося б: високоточне вимірювання як вологості, так й температури проб; виключення на результат вимірювання нестабільності параметрів функції перетворення ємності у частоту електричних сигналів та початкового значення частоти генератора; підвищення точності вимірювання при часовій та температурній нестабільності параметрів функції перетворення каналу вимірювання температури; виключення на результат вимірювання повільного впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів та приведення результату вимірювання вологості при тій же температурі, що й температура проби з нормованою за значенням вологістю.

Поставлена задача вирішується шляхом створення цифрового вимірювача вологості зерна та інших сипких матеріалів, що містить послідовно з'єднані між собою генератор електричних сигналів, формувач імпульсів і лічильник імпульсів, послідовно з'єднані між собою джерело стабільного струму, перший резистор, підсилювач та аналого-цифровий перетворювач, другий резистор, що підключений між входом підсилювача та земляною шиною, перший сенсор температури, перший та другий ємнісні сенсори вологості, входи яких об'єднані між собою і з земляною шиною, виходи першого та другого ємнісних сенсорів вологості з'єднані між собою через послідовно включені конденсатор та варикап, об'єднані різнойменні входи конденсатора та варикапа підключені до виходу першого цифроаналогового перетворювача, мікроконтролер, входи-виходи порту „С” якого через загальну шину з'єднані зі виходами першого цифро-аналогового перетворювача, цифрового відлікового пристрою і клавіатури, входи-виходи порту „В” мікроконтролера підключені до виходів аналого-цифрового перетворювача, входи-виходи порту „D” з'єднані з виходами та входами управ-

ління лічильника імпульсів, який від відомих відрізняється тим, що в нього додатково введені резистивний нагрівач термостату, другий цифроаналоговий перетворювач, другий сенсор температури, третій ємнісний сенсор вологості (без проби), третій стабільний і нормований за значенням опору резистор, перший, другий, третій, четвертий, п'ятий і шостий автоматичні перемикачі, перший вхід першого автоматичного перемикача з'єднаний з об'єднаними між собою виходом другого і другим входом третього автоматичних перемикачів і підключений до виходу першого сенсора вологості, другий вхід першого автоматичного перемикача з'єднаний з другим входом другого автоматичного перемикача і підключений до виходу другого сенсора вологості, вихід першого автоматичного перемикача з'єднаний з виходом третього ємнісного сенсора вологості, чий вхід підключений до земляної шини, з першим входом третього автоматичного перемикача, вхід управління першого автоматичного перемикача підключений до виходу другого розряду порту „А” мікроконтролера, вихід третього розряду порту „А” якого підключений до з'єднаних між собою входів управління другого і третього автоматичних перемикачів, вихід четвертого розряду порту „А” з'єднаний зі входом управління четвертого автоматичного перемикача, вихід якого підключений через перший резистор до джерела стабільного струму, через другий резистор - до земляної шини і, безпосередньо, до входу підсилювача, перший та другий входи четвертого і п'ятого автоматичних перемикачів підключені, відповідно, до першого та другого сенсорів температури, причому другий вхід четвертого і перший вхід п'ятого автоматичних перемикачів з'єднані між собою і з об'єднаними різноименними входами сенсорів температури, вхід управління п'ятого автоматичного перемикача підключений до виходу шостого розряду порту „А” мікроконтролера, п'ятий розряд порту „А” якого з'єднаний зі входом управління шостого автоматичного перемикача, перший вихід якого через третій резистор, другий вихід - безпосередньо підключені до земляної шини, вхід шостого автоматичного перемикача з'єднаний з виходом п'ятого автоматичного перемикача, при цьому один кінець резистивного нагрівача термостату підключений до земляної шини, а другий - до виходу другого цифроаналогового перетворювача.

На малюнку наведена функціональна схема цифрового вимірювача вологості зерна чи інших сипких матеріалів, де 1 - термостат; 2 - резистивний нагрівач; 3 і 4 - перший та другий ємнісні (робочі) сенсори вологості; 5 - стабільний конденсатор; 6 - варикап; 7, 8 і 9 - перший, другий і третій автоматичні перемикачі; 10 - третій (пасивний) ємнісний сенсор вологості; 11, 12, і 13 - відповідно, генератор електричних сигналів, підсилювач-формував і лічильник імпульсів; 14 і 15 перший та другий сенсори температури; 16, 17 і 18 - четвертий, п'ятий і шостий автоматичні перемикачі; 19, 20 і 21 - перший, другий і третій резистори; 22 - джерело стабільного струму; 23 - підсилювач; 24 - аналого-цифровий перетворювач; 25 і 26 - перший і другий цифроаналогові перетворювачі; 27 - циф-

ровий відліковий пристрій; 28 - клавіатура; 29 - загальна шина; 30 - мікроконтролер.

Причому, цифровий вимірювач вологості зерна та інших сипких матеріалів, містить послідовно з'єднані між собою генератор 11 електричних сигналів, формував імпульсів 12 і лічильник 13 імпульсів; послідовно з'єднані між собою джерело 22 стабільного струму, перший резистор 19, підсилювач 23 та аналого-цифровий перетворювач 24; другий резистор 29, що підключений між входом підсилювача 23 та земляною шиною; перший та другий сенсори 14 і 15 температури.

Входи першого та другого ємнісні сенсорів вологості 3 і 4 об'єднані між собою і з земляною шиною. Входи першого та другого ємнісних сенсорів вологості 3 і 4 з'єднані між собою через послідовно включені конденсатор 5 та варикап 6. Об'єднані різноименні входи конденсатора 5 та варикапа 6 підключені до виходу першого цифроаналогового перетворювача 25. Входи-виходи порту „С” мікроконтролера 30 через загальну шину 29 з'єднані з входами першого цифроаналогового перетворювача 25, цифрового відлікового пристрою 27 і клавіатури 28. Входи-виходи порту „5” мікроконтролера 30 підключені до виходів аналого-цифрового перетворювача 24. Входи-виходи порту „В” мікроконтролера 30 з'єднані з виходами та входами управління лічильника імпульсів 13.

Від відомих вимірювач відрізняється тим, що в нього додатково введені резистивний нагрівач 2 термостату 1, другий цифроаналоговий перетворювач 26, другий сенсор температури 15, третій ємнісний сенсор 10 вологості (без проби), третій стабільний і нормований за значенням опору резистор 21, перший, другий, третій, четвертий, п'ятий і шостий автоматичні перемикачі 7, 8, 9, 16, 17 і 18.

Перший вхід першого автоматичного перемикача 7 з'єднаний з об'єднаними між собою виходом другого і другим входом третього автоматичних перемикачів 8 і 9 і підключений до виходу першого ємнісного сенсора 7 вологості. Другий вхід першого автоматичного перемикача 7 з'єднаний з другим входом другого автоматичного перемикача 8 і підключений до виходу другого ємнісного сенсора вологості 8. Вихід першого автоматичного перемикача 7 з'єднаний з виходом третього ємнісного сенсора 10 вологості, чий вхід підключений до земляної шини і з першим входом третього автоматичного перемикача 9.

Вхід управління першого автоматичного перемикача 7 підключений до виходу другого розряду порту „А” мікроконтролера 30. Вихід третього розряду порту „А” мікроконтролера 30 підключені до з'єднаних між собою входів управління другого і третього автоматичних перемикачів 8 і 9. Вихід четвертого розряду порту „А” мікроконтролера 30 з'єднаний зі входом управління четвертого автоматичного перемикача 16, вихід якого підключений через перший резистор 19 до джерела 22 стабільного струму, через другий резистор 20 - до земляної шини і, безпосередньо, до входу підсилювача 23.

Перший та другий входи четвертого і п'ятого автоматичних перемикачів 16 і 17 підключені, від-

повідно, до першого та другого сенсорів температури 14 і 15. Причому другий вхід четвертого і перший вхід п'ятого автоматичних перемикачів 14 і 15 з'єднані між собою і з об'єднаними різнойменними входами сенсорів температури 14 і 15. Вхід управління п'ятого автоматичного перемикача 17 підключений до виходу шостого розряду порту „А” мікроконтролера 30, п'ятий розряд порту „А” якого з'єднаний зі входом управління шостого автоматичного перемикача 18.

Перший вихід шостого автоматичного перемикача 18 через третій резистор 21, другий вихід - безпосередньо підключені до земляної шини. Вхід шостого автоматичного перемикача 18 з'єднаний з виходом п'ятого автоматичного перемикача 17. При цьому один кінець резистивного нагрівача 2 термостату 1 підключений до земляної шини, а другий - до виходу другого цифроаналогового перетворювача 26.

Відомо, що частота електричних сигналів

$$f_{x1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_x L_k}} = \frac{1}{k\sqrt{C_x}} = \frac{1}{k\sqrt{\varepsilon_x s_c / l_c}} = \frac{1}{k\sqrt{\varepsilon_x v_c / l_c^2}} = \frac{1}{K\sqrt{\varepsilon_x}}, \quad (1)$$

де L_k - індуктивність коливального кола генератора; C_x - ємність коливального кола; ε_x - діелектрична 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 $K = k\sqrt{s_c / l_c}$, 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 обкладинками конденсатору змінює його ємність. З (1) можна зробити висновок, що діелектрична проникність та ємність зворотно пропорційні квадрату частоти: $\varepsilon_x = 1/K^2 f_x^2$, а $C_x = 1/k^2 f_x^2$. Тобто й вологість зворотно пропорційна квадрату частоти електричних коливань.

Робота цифрового вимірювача вологості зерна та інших сипких речовин складається з трьох тактів вимірювання вологості проб і четвертого такту обробки результатів, та з одночасно й паралельно проведеними шести (два по три) тактів вимірювання температури кожного сенсора вологості й одного такту обробки результатів проміжних вимірювань.

Після ввімкнення живлення всі функціональні блоки встановлюються в вихідний стан. На термостат 1 струм через резистивний нагрівач 2 від цифро-аналогового перетворювача 26 не поступає тому, що на його входи по команді з мікроконтролера 30 поступає код числа нуль. Відліковий пристрій 27 показує нуль. Автоматичні перемикачі 7, 8, 9, 16, 17 і 18 встановлюються у положення, показане на Фіг. Слід зазначити, що сенсори вологості 3, 4 і 10 з електричною ємністю C_e до частото-задаючого кола генератора 11 підключаються по чергово за допомогою автоматичних перемика-

чів 7, 8 і 9. За допомогою автоматичного перемикача 9 до цього кола додатково підключається ще й електрична ємність C_e третього (пасивного) сенсора вологості 10.

За допомогою клавіатури 28 встановлюється необхідний режим роботи цифрового вимірювача вологості: підготовка приладу до вимірювання вологості (пов'язане з підготовкою проб й вирівнюванні температур сенсора вологості 4 й нормованої за значенням вологості проби), однократне вимірювання, багатократне вимірювання вологості і температури тощо.

Спочатку здійснюється автоматичне вирівнювання електричних ємностей сенсорів 3 і 4 без наявності проб зерна чи іншого сипкого матеріалу. Після натиснення кнопки „#” (підготовка), по команді з мікроконтролера 30 на цифрові входи аналого-цифрового перетворювача 25 поступають коди чисел від N_{B1} до N_{Bk} . В результаті на виході цифро-аналогового перетворювача 25 з'являється напруга, що лінійно змінюється, за значенням, від $\{U_{B1}\}$ до $\{U_{Bk}\}$. Ця напруга поступає на з'єднанні між собою різнойменні входи конденсатора 5 і варикапа 6, що підключені до виходів першого і другого сенсорів вологості 3 і 4 (див. Фіг.). За допомогою першого автоматичного перемикача 7 здійснюється по чергове підключення першого і другого сенсорів вологості 3 і 4 до входу генератора 11 електричного сигналу і вимірювання частоти цього сигналу. У момент часу досягнення рівності значень частот вихідного сигналу $\{f_{x01}\} \rightarrow \{f_{x02}\} \rightarrow \{f_{x0}\}$ при включеному спочатку першому, а потім - другому сенсорів вологості 3 і 4, запам'ятовується відповідний код числа N_{Bk} та код числа

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

де Δt_0 - нормований за значенням проміжок часу підрахунку у лічильнику 13 кількості імпульсів, що слідують з частотою f_{x0} .

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. На рідінокристалевому індикаторі цифрового відлікового пристрою 27 з'явиться напис „ємності вирівняні, встановлюйте проби”. У ємність першого сенсора вологості 3 встановлюють пробу зерна чи іншого сипкого матеріалу заданого об'єму v_c з невідомою вологістю W_x та температурою T_{c1} , що дорівнює температурі оточуючого середовища. У ємність другого сенсора вологості 4 встановлюють пробу того ж об'єму v_c , але з нормованою за значенням вологістю W_0 і при температурі T_{c2} .

Дійсно, у загальному випадку проби зерна чи іншого сипкого матеріалу можуть мати різну за значенням температуру, а від температури залежить й вологовміст досліджуваного зерна чи іншого сипкого матеріалу.

При натисненні клавіші „*” (Пуск) на клавіатурі 28, видається команда на здійснення автоматичного процесу вимірювання вологості й температури проб.

Спочатку вимірюється температура T_{c2} другого сенсора вологості 4. За допомогою термостату 1 здійснюється стабілізація температури проби (і самого сенсора 4) на заздалегідь заданому рівні, наприклад при температурі $T_{c2} = T_n = 20^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$, при якій здійснювалося приготування проби зерна чи іншого сипкого матеріалу з нормованою за значенням вологістю W_0 . Це забезпечується за командою з мікропроцесора 30 шляхом пропускання через резистивний нагрівач 2 струму заданого значення від другого цифро-аналогового перетворювача 26, на цифрові входи якого подається відповідні коди чисел з одночасним вимірюванням температури проби й сенсора 4. Встановлення необхідного струму через резистивний нагрівач 2 здійснюється до моменту часу встановлення заданого значення температури, тобто $T_{c2} \rightarrow T_n$. Процес вимірювання температур сенсорів вологості 3 і 4 буде описаний нижче окремо.

Через заданий час Δt_0 у сенсорі вологості 3 з пробю невідомої за значенням вологості встановлюється температура оточуючого середовища, тобто $T_{c1} \rightarrow T_{\text{ср}}$, а у сенсорі 4 - температура $T_{c2} \rightarrow T_n$.

Після цього здійснюється вимірювання значень частот електричних сигналів генератора 11.

У першому такті вимірюється частота f_{x1} електричного сигналу генератора 11, при положеннях автоматичних перемикачів 7, 8 і 9, що показані на Фіг. Значення частоти f_{x1} вимірюється за допомогою вимірювального каналу, що складається з формувача 12 лічильних імпульсів та лічильника імпульсів 13, виходи якого підключені до порту „D” мікроконтролера 30. Отримане значення частоти

$$N_{x1} = f_{x1} \Delta t_0 = \zeta_{x0} - \Delta f_{x1} \Delta t_0, \quad (3)$$

де Δf_{x1} - зміна частоти за рахунок підключення до генератора сенсора з невідомою за значенням вологості пробю, запам'ятовується у оперативній пам'яті мікроконтролера 30.

У другому такті, по команді з виходу другого розряду порту „А” мікроконтролера 30, автоматичний перемикач 7 переводиться у положення, протилежне показаному на Фіг. При цьому його положенні до генератора 11 електричного сигналу підключається другий сенсор 4. Генератор 11 генерує електричний сигнал частоти f_{x2} . Значення цієї частоти вимірюється за допомогою зазначеного вище вимірювального каналу. В результаті отримують код числа

$$N_{x2} = f_{x2} \Delta t_0 = \zeta_{x0} - \Delta f_{x2} \Delta t_0, \quad (4)$$

де Δf_{x2} - зміна частоти генератора за рахунок підключення до генератора сенсора з відомою за значенням вологості пробю; який запам'ятовується у оперативній пам'яті мікроконтролера 30.

У третьому такті, по команді з виходу третього розряду порту „А” мікроконтролера 30, автоматичні перемикачі 8 і 9 одночасно переводяться у положення, протилежне показаному на рисунку. В результаті від входу генератора 11 відключаються паралельно з'єднані перший і третій (пасивний, з електричною ємністю C_e) сенсори вологості 3 і 10. Завдяки зв'язку виходу першого сенсора вологості з виходом другого автоматичного перемикача 8, здійснюється паралельне з'єднання першого і другого сенсорів вологості 3 і 4. Тому у цьому такті до входу генератора 11 підключаються паралельно включені перший та другий сенсори вологості 3 і 4. На виході генератора 11 формується електричний сигнал частоти f_{x3} . За допомогою блоків 12, 13 і 30 вимірюється та запам'ятовується отримане значення частоти, тобто

$$N_{x3} = f_{x3} \Delta t_0 = \zeta_{x0} - \Delta f_{x3} \Delta t_0, \quad (5)$$

де Δf_{x3} - зміна частоти генератора за рахунок підключення обох сенсорів вологості до генератора.

У четвертому такті відбувається обробка результатів проміжних вимірювань отриманих значень частот електричних сигналів генератора 11 згідно з рівнянням надлишкових вимірювань

$$W_x = W_0 \frac{\zeta_{x3} - f_{x0}^2 / \zeta_{x2} - f_{x0}^2 - f_{x0}^0}{\zeta_{x3} - f_{x0}^2 / \zeta_{x1} - f_{x0}^2 - f_{x0}^0}, \quad (6)$$

або за рівнянням числових значень

$$N_{Wx} = N_{W0} \frac{\zeta_{x3} - N_{x0}^2 / \zeta_{x2} - N_{x0}^2 - 1}{\zeta_{x3} - N_{x0}^2 / \zeta_{x1} - N_{x0}^2 - 1} \quad (7)$$

чи

$$N_{Wx} = N_{W0} \frac{\Delta N_{x3}^2 / \Delta N_{x2}^2 - 1}{\Delta N_{x3}^2 / \Delta N_{x1}^2 - 1} = N_{W0} \frac{\Delta N_{x1}^2}{\Delta N_{x2}^2} \cdot \frac{\Delta N_{x3}^2 - \Delta N_{x2}^2}{\Delta N_{x3}^2 - \Delta N_{x1}^2},$$

де

$$\Delta N_{x3} = N_{x3} - N_{x0}; \Delta N_{x2} = N_{x2} - N_{x0}; \Delta N_{x1} = N_{x1} - N_{x0},$$

які забезпечують автоматичну корекцію похибок результаті вимірювання завдяки реалізації методу надлишкових вимірювань.

В результаті отримують дійсне значення вологості проби зерна чи іншого сипкого матеріалу при температурі оточуючого середовища, тобто при $T_{c1} \rightarrow T_{\text{ср}}$.

З рівняння числових значень (7) видно, що на результат визначення вологості зерна чи іншого сипкого матеріалу не впливають довгострокова нестабільність частоти генератора 11, абсолютні значення та зміна ємностей сенсорів температури в результаті дії зовнішніх дестабілізуючих факторів. Тобто при умові, що за час циклу вимірювання значення частот і ємностей сенсорів не змінюються. У цьому можна переконатися, якщо у (7) підставити відповідні аналітичні вирази (3), (4) і (5) для числових значень напруг, враховуючи, що довгострокова нестабільність вихідної частоти генератора описується наступним рівнянням величин $f'_0 = f_0 (\zeta_f^0 + \gamma_f)$, де $\zeta_f^0 = 1$, γ_f - відносна довгострокова зміна частоти генератора під дією зовнішніх дестабілізуючих факторів. На результат вимірювання не впливає й вибір значення часового інтер-

валу Δt_0 .

Як вже зазначалося, одночасно з вимірюванням частоти електричних сигналів, здійснюється вимірювання температури сенсорів вологості 3 і 4 методом надлишкових вимірювань. Причому за час вимірювання дійсного значення вологості проби зерна чи іншого сипкого матеріалу, що дорівнює одному циклу вимірювань, здійснюється вимірювання температури першого та другого сенсорів вологості 3 і 4. Причому, здійснюється перетворення у напругу, при двох значеннях коефіцієнту k_n підсилення підсилювача 23, опорів першого та другого сенсорів температури 14 і 15 і опорів третього резистора 21 з нормованим за значенням опором, що відповідає температурі, наприклад, 20°C при струмі I_0 .

За результатами вимірювань зазначених напруг визначається температура кожного сенсора вологості.

Для перемикання першого та другого сенсорів температури 14 і 15 і третього резистора 21 використовуються автоматичні перемикачі 16, 17 і 18, які управляються сигналами з виходів 4, 5 і 6 порту „А” мікроконтролера 30.

Спочатку, у першому такті вимірювання температури першого сенсора вологості 3, автоматичні перемикачі 16, 17 і 18 знаходяться у положенні, що показане на Фіг. В результаті через послідовно з'єднані між собою опори першого резистору 19, замкненого автоматичного перемикача 16, першого сенсору температури 14, що розміщений в сенсорі 3 вологості, замкнених автоматичних перемикачів 17 і 18 потече стабільний за значенням струм I_0 від джерела 22 стабільного струму. В результаті на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів першого сенсора температури 14, замкнених автоматичних перемикачів 16, 17 і 18 та з'єднувальних провідників, здійснюється падіння напруги, яка, за допомогою підсилювача 23, підсилюється у задане число k_{n1} разів. Отримана напруга

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

де I_0 - стабільний за значенням струм через електричне коло, з опором R_{c1} сенсора температури 14, пропорційному температурі T_{c1} ; k_{n1} - коефіцієнт підсилення падіння напруги на опорах R_{c1} і r_0 ; r_0 - неінформативний опір кола (перехідний опір трьох замкнених автоматичних перемикачів та опір з'єднувальних провідників); $R_{c1} = S'_t T_{c1}$; S'_t - крутість перетворення температури у опір, за допомогою аналого-цифрового перетворювача 24 перетворюється у код числа

$$N_1 = S_0 U_1, \quad (9)$$

де S_0 - крутість аналого-цифрового перетворення, який запам'ятовується у оперативній пам'яті мікроконтролера 30.

У другому такті вимірювання температури першого сенсора вологості 3, по команді з виходу шостого розряду порту "А" мікроконтролера 30, автоматичний перемикач 18 встановлюється у

положення, що протилежне показаному на Фіг. В результаті струм потече через послідовно з'єднані між собою опори першого резистору 19, сенсора температури 14, замкнених автоматичних перемикачів 16, 17, 18 та третього резистора 21. На вхід підсилювача 23 поступить напруга

$$U_2 = k_{n1} I_0 (R_{c1} + R_0 + r_0), \quad (10)$$

де R_0 - опір третього резистора 21 з нормованим за значенням опором, пропорційний температурі, наприклад, $T_0 = 20^\circ\text{C}$ при струмі I_0 , тобто $R_0 = S'_t T_0$, що отримана за рахунок падіння струму на послідовно з'єднаних між собою опорах першого сенсора температури 14, замкнених автоматичних перемикачів 16, 17 і 18 та з'єднувальних провідників. Зазначена напруга за допомогою підсилювача 23, підсилюється у k_{n1} раз. Отримана напруга U_2 , що містить інформацію про сумарну температуру $T_{10} = \{T_{c1} \cup T_0\}$, що дорівнює сумі температур T_{c1} проби першого сенсора вологості 3 і температурі T_0 , за допомогою аналого-цифрового перетворювача 24 перетворюється у код числа

$$N_2 = S_0 U_2, \quad (11)$$

та запам'ятовується у оперативній пам'яті мікроконтролера 30.

У третьому такті вимірювання температури першого сенсора вологості 3, по команді з четвертого і шостого розрядів порту „А” мікроконтролера 30, автоматичні перемикачі 16 і 17 встановлюються у положення, протилежне показаному на Фіг. В результаті через опір третього резистора 21 та опори замкнених автоматичних перемикачів 16, 17, 18 та з'єднувальних провідників потече стабілізований за значенням струм від джерела 22 стабільного струму. В результаті на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів третього резистору 21, замкнених трьох автоматичних перемикачів 16, 17 і 18 та з'єднувальних провідників, здійснюється падіння напруги, яка за допомогою підсилювача 23 також підсилюється у задане число k_{n1} разів. Отримана напруга

$$U_3 = k_{n1} I_0 (R_0 + r_0), \quad (12)$$

що містить інформацію про опорну за значенням температуру T_0 , за допомогою аналого-цифрового перетворювача 24 перетворюється у код числа

$$N_3 = S_0 U_3, \quad (13)$$

та запам'ятовується у оперативній пам'яті мікроконтролера 30.

Про дійсне значення температури T_{c1} сенсора 3 з судять за рівнянням числових значень

$$N_{Tc1} = \frac{N_2 - N_3}{N_2 - N_1} \cdot T_0. \quad (14)$$

Аналогічно визначається температура T_{c2} сенсора з нормованою за значенням вологості пробою.

Оскільки чутливості лінійного перетворення

температури у опір неідентичні за значенням, тобто $R_{c1} = S'_t T_{c1}$, а $R_{c2} = S'_t T_{c2}$, то визначення температури T_{c2} здійснюється при значенні коефіцієнта підсилення підсилювача 23 рівному k_{n2} . Причому значення коефіцієнту k_{n2} вибирається таким, щоб напруги мали однакову чутливість до вимірювальних температур, тобто, щоб $k_{n1} S'_{t1} = k_{n2} S'_{t2} = S'_t$.

У першому такті вимірювання температури другого сенсора вологості 4, автоматичний перемикач 18 остається у положенні, що показане на Фіг., а автоматичні перемикачі 16 і 17 по команді з четвертого і шостого розрядів порту „А“, встановлюються у положення, протилежне показаному на Фіг.

В результаті через послідовно з'єднані між собою опори першого резистору 19, замкненого (у іншому положенні) автоматичного перемикача 16, другого сенсора температури 15, що розміщений в сенсорі 4 вологості, замкнених автоматичних перемикачів 17 і 18 потече стабільний за значенням струм I_0 від джерела 22 стабільного струму. В результаті на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів другого сенсора температури 15, замкнених за станом положення автоматичних перемикачів 16, 17 і 18 та з'єднувальних провідників, здійснюється падіння напруги, яка, за допомогою підсилювача 23, підсилюється у задане число k_{n2} разів. Отримана напруга

$$U_4 = k_{n2} I_0 (R_{c2} + r_0), \quad (15)$$

де I_0 - стабільний за значенням струм через електричне коло, з опором R_{c2} сенсора температури 15, пропорційному температурі T_{c2} ; k_{n2} - коефіцієнт підсилення падіння напруги на опорах R_{c1} і r_0 ; r_0 - неінформативний опір кола (перехідний опір трьох замкнених автоматичних перемикачів та опір з'єднувальних провідників); $R_{c2} = S'_t T_{c2}$; S'_t - крутість перетворення температури у опір, за допомогою аналого-цифрового перетворювача 24 перетворюється у код числа

$$N_4 = S_0 U_4, \quad (16)$$

який запам'ятовується у оперативній пам'яті мікроконтролера 30.

У другому такті вимірювання температури другого сенсора 4 вологості, по команді з виходу шостого розряду порту „А“ мікроконтролера 30, автоматичний перемикач 18 встановлюється у положення, що протилежне показаному на Фіг. В результаті струм потече через послідовно з'єднані між собою опори першого резистору 19, сенсора температури 15, замкнених автоматичних перемикачів 16, 17, 18 та третього резистора 21. На вхід підсилювача 23 поступає напруга

$$U_5 = k_{n2} I_0 (R_{c2} + R_0 + r_0), \quad (17)$$

що отримана за рахунок падіння струму на послідовно з'єднаних між собою опорах другого сенсора температури 15, замкнених автоматичних перемикачів 16, 17 і 18 та з'єднувальних провідників. Зазначена напруга за допомогою підсилювача

16, підсилюється у k_{n2} раз. Отримана напруга U_5 , що містить інформацію про сумарну температуру $T_{20} (T_{20} = T_{c2} + T_0)$, що дорівнює сумі температур T_{c2} проби другого сенсора вологості 4 і температурі T_0 , за допомогою аналого-цифрового перетворювача 24 перетворюється у код числа

$$N_5 = S_0 U_5, \quad (18)$$

та запам'ятовується у оперативній пам'яті мікроконтролера 30.

У третьому такті вимірювання температури другого сенсора вологості, по команді з шостого розряду порту „А“ мікроконтролера 30, автоматичний перемикач 17 встановлюється у положення, показане на Фіг. В результаті через опір, що складається з опору третього резистора 21 та опорів замкнених автоматичних перемикачів 16, 17, 18 та з'єднувальних провідників потече стабілізований за значенням струм від джерела 22 стабільного струму. В результаті на опорі, що складається з послідовно з'єднаних між собою опорів третього резистору 21, замкнених трьох автоматичних перемикачів 16, 17 і 18 та з'єднувальних провідників, здійснюється падіння напруги, яка за допомогою підсилювача 23 також підсилюється у задане число k_{n2} разів. Отримана напруга

$$U_6 = k_{n2} I_0 (R_0 + r_0), \quad (19)$$

що містить інформацію про опорну за значенням температуру T_0 , за допомогою аналого-цифрового перетворювача 24 перетворюється у код числа

$$N_6 = S_0 U_6, \quad (20)$$

та запам'ятовується у оперативній пам'яті мікроконтролера 30.

Про дійсне значення температури T_{c2} другого сенсора 4 вологості судять за рівнянням числових значень

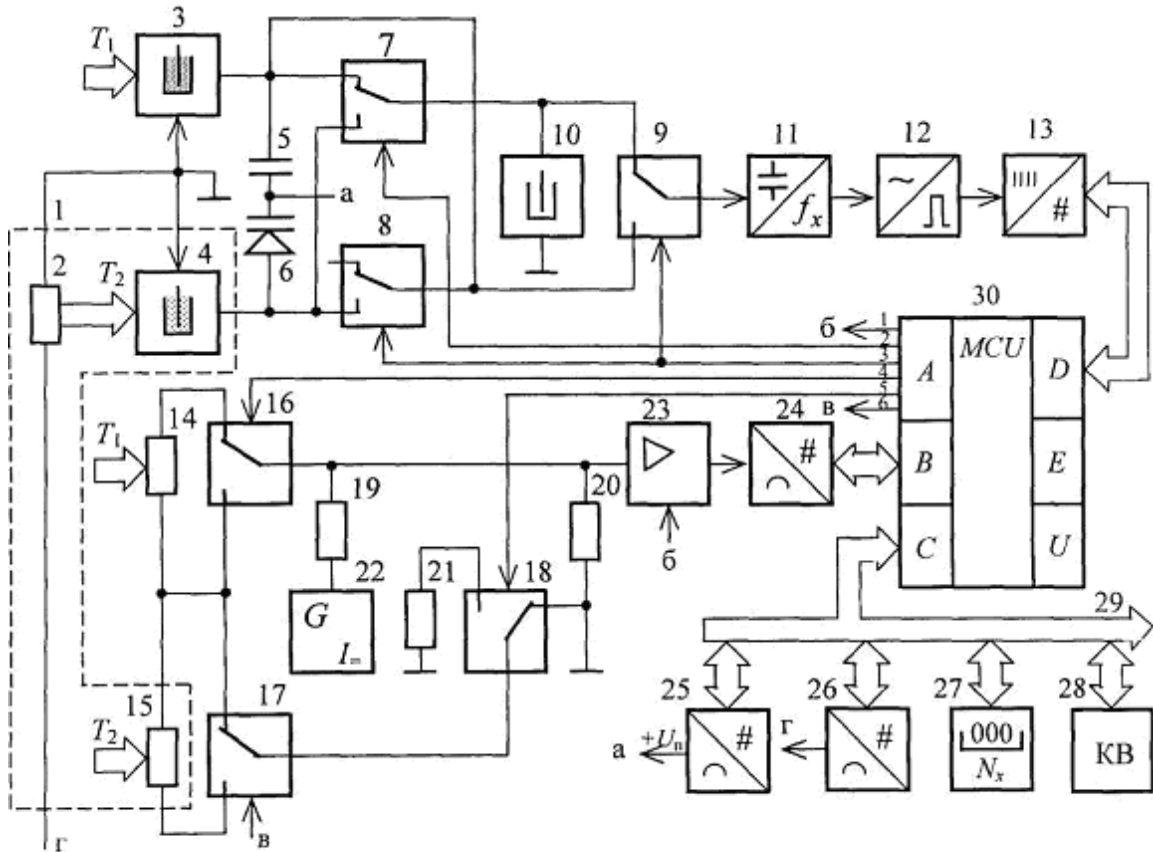
$$N_{Tc2} = T_0 \frac{N_5 - N_6}{N_5 - N_4}. \quad (21)$$

Як видно з (14) і (21), отримані результати надлишкових вимірювань температури першого та другого сенсорів вологості не залежать від абсолютних значень опорів автоматичних перемикачів, що знаходяться у замкнутому стані, від абсолютних значень та відхилень від номінальних значень крутості перетворень S_0, S'_t, S''_t та коефіцієнтів підсилення k_{n1} і k_{n2} , при умові їх довгострокових змін у часі, тобто коли за час вимірювання їх значення постійні. Все це забезпечує отриманні високої точності вимірювання температур обох сенсорів, а також високої точності стабілізації температури другого сенсора вологості.

Таким чином, запропоноване технічне рішення цифрового вимірювача вологості зерна чи інших сипких матеріалів забезпечує вирішення поставленої технічної задачі, тобто забезпечує високоточне вимірювання як вологості, так й температури проб за рахунок автоматичної корекції похибок, виключення на результат вимірювання нестабільності функцій перетворення ємності у частоту еле-

ктричних сигналів та початкового значення частоти генератора електричних сигналів, 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.



Фіг. Функціональна схема цифрового вимірювача вологості зерна та інших сипучих матеріалів.