

УДК 53.093.08: 681.586.5

В.Т. Кондратов

Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України

Л.О. Ковтун

Хмельницький національний університет

**НАДЛИШКОВІ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ
ОПТИЧНО-ПРОЗОРИХ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ ЕФЕКТИВНІСТЬ**

Стаття присвячена аналізу похибок та ефективності надлишкових вимірювань вологості оптично-прозорих листових матеріалів у порівнянні із прямим методом, а також описано метод надлишкових вимірювань, який реалізовано за допомогою запропонованого цифрового вимірювача вологості.

This article is devoted to analysis the errors and the effectiveness of surplus measurements of optically-transparent sheet material in comparison with the direct method and also provides a method of surplus measurements, which is implemented using the proposed digital gauge humidity.

Ключові слова: вимірювання вологості, надлишкові вимірювання.

Вступ

Основною характеристикою вимірювальних процесів є точність вимірювання. Прямим методам вимірювання вологості властива невисока точність вимірювання вологості оптично-прозорих листових матеріалів. Це обумовлено тим, що на результат впливає нестабільність параметрів вимірювального каналу, чутливість до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів, дрейф нуля тощо. Питанням підвищення точності вимірювання займалися і займаються такі відомі вчені, як Кондратов В.Т., Скрипник Ю.О., Мухітдінов М., Мусаєв Э., Кейсі С., Фляте Д.М., Золотова-Спановська Н., Іванов С., Лаптев Л., Козаровицький Л.А. та інші [1-8]. Одні з них використовували диференційні методи, інші – стабілізацією потужності потоку оптичного випромінювання (ПОВ) джерела, температурну стабілізацію параметрів фотоприймача тощо. Зазначені прийоми забезпечували підвищення точності вимірювання у 1,3-1,5 разів, що є недостатнім для сучасних потреб. Промисловість потребує ще більшого підвищення точності вимірювання вологості оптично-прозорих листових матеріалів. Ця задача успішно вирішується методами надлишкових вимірювань [9-11]. Особливістю цих методів є те, що вимірюється не одна фізична величина, а ряд фізичних величин, які створені з фізичної величини невідомого розміру та нормованих за значенням фізичних величин, що відтворюються. Тема зазначеної роботи безумовно є актуальною.

Об'єктом дослідження є процес надлишкових вимірювань оптично-прозорих листових матеріалів.

Предметом дослідження є аналіз похибок та ефективності надлишкових вимірювань оптично-прозорих листових матеріалів у порівнянні із прямим методом (при лінійній функції перетворення вимірювального каналу).

Результати дослідження

Поглинання потоку оптичного випромінювання, який пройшов через зразок матеріалу із невідомою за значенням концентрації вологістю, відбувається за законом Ламберта-Бугера-Бера [1]. Згідно з цим законом потужність потоку оптичного випромінювання, що пройшов через вологий матеріал, описується рівнянням величин

$$\Phi_x = \Phi_0 e^{-(a_b C_x + a_{\text{ц}}(1-C_x) + k_p) l_e}, \quad (1)$$

де Φ_0 – нормований за значенням потужності потік оптичного випромінювання із довжиною хвилі l , що поступає на вологий матеріал; a_b – коефіцієнт поглинання води на довжині хвилі l ; $a_{\text{ц}}$ – коефіцієнт поглинання матеріалу на довжині хвилі l ; C_x – концентрація вологи досліджуваного матеріалу (ДМ); k_p – коефіцієнт розсіювання; l_e – ефективна товщина матеріалу із невідомою вологістю.

При лінійній функції перетворення сигнал на виході вимірювального каналу може бути записаний наступним чином

$$U_x = S_{\text{л}} \Phi_0 e^{-(a_b C_x + a_{\text{ц}}(1-C_x) + k_p) l_e} + \Delta U_{\text{зм}}, \quad (2)$$

де U_x – вихідна напруга фотоприймача; $\Delta U_{\text{зм}}$ – напруга зміщення фотоприймача; $S_{\text{л}}$ – номінальна за значенням крутизна функції перетворення фотоприймача.

При застосуванні методу прямих вимірювань, значення концентрації вологості C_x матеріалу може бути визначена згідно (2) за рівнянням вимірювання

$$C_x = \frac{\ln \frac{U_x - \Delta U_{\text{зм}}}{S_{\text{л}} \Phi_0} + (k_p + a_{\text{ц}}) l_e}{(a_{\text{ц}} - a_b) l_e}, \quad (3)$$

якщо відомі номінальні значення параметрів $S'_л$, Φ_0 , k_p , $a_{ц}$, l_e , a_b , U_x , $\Delta U_{3м}$. Їх дійсні значення відомі тільки на момент часу калібрування чи атестації приладу. Під дією зовнішніх дестабілізуючих факторів зазначені параметри змінюються. В результаті напруга U_x , що отримується на виході вимірювального каналу, буде включати в себе додаткові систематичні похибки. Тому визначення концентрації вологості C_x за рівнянням вимірювання (3) не забезпечує високу точність вимірювання.

В роботі [10] описано метод надлишкових вимірювань вологості оптично-прозорих листових матеріалів, який виключає додаткові похибки і забезпечує високу точність вимірювання концентрації вологості. Але даний метод має недостатню швидкодню за рахунок витрат часу на зміну одного зразка оптично-прозорого листового матеріалу іншим. Для підвищення швидкодії нами був запропонований метод надлишкових вимірювань концентрації вологості оптично-прозорих матеріалів із застосуванням двох зразків.

Математична модель методу надлишкових вимірювань будується із врахуванням того, що функція перетворення вимірювального каналу є лінійною. Згідно з законом Ламберта-Бугера-Бера (1) залежність вихідної напруги вимірювального каналу від досліджуваної величини є нелінійною. Обраний нами метод вимірювання оснований на застосуванні двох зразків матеріалу із відомими значеннями концентрацій вологості C_{01} і C_{02} та на додаткових вимірюваннях потужностей потоків оптичного випромінювання, що пройшли через ці зразки.

Математична модель запропонованого методу надлишкових вимірювань представляє собою систему із п'яти нелінійних рівнянь величини:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= S_{л} \Phi_{00} + \Delta U_{3м} = \Delta U_{3м}; \\ U_1 &= S_{л} \Phi_0 e^{-(a_b C_{01} + a_{ц}(C_{\Sigma} - C_{01}) + k_p) l_e} + \Delta U_{3м} = S'_{л} \Phi_{01} e^{-(a_b C_0 + a_{ц}(C_{\Sigma} - C_0) + k_p) l_e} + \Delta U_{3м}; \\ U_2 &= S_{л} \Phi_0 e^{-(a_b C_{02} + a_{ц}(C_{\Sigma} - C_{02}) + k_p) l_e} + \Delta U_{3м} = S'_{л} \Phi_{02} e^{-(a_b C_0 + a_{ц}(C_{\Sigma} - C_0) + k_p) l_e} + \Delta U_{3м}; \\ U_3 &= S_{л} \Phi_{01} e^{-(a_b C_x + a_{ц}(C_{\Sigma} - C_x) + k_p) l_e} + \Delta U_{3м} = S'_{л} \Phi_0 e^{-(a_b (C_x + C_{01}) + a_{ц}(C_{\Sigma} - (C_x + C_{01})) + k_p) l_e} + \Delta U_{3м}; \\ U_4 &= S_{л} \Phi_{02} e^{-(a_b C_x + a_{ц}(C_{\Sigma} - C_x) + k_p) l_e} + \Delta U_{3м} = S'_{л} \Phi_0 e^{-(a_b (C_x + C_{02}) + a_{ц}(C_{\Sigma} - (C_x + C_{02})) + k_p) l_e} + \Delta U_{3м}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

які характеризують стан системи ДМ-ЦВВ у задані дискретні проміжки часу (такти вимірювання). Рішення цієї системи забезпечує отримання рівняння надлишкових вимірювань у вигляді

$$C_x = \Delta C_0 \cdot \frac{\ln(U_1 - U_0) + \ln(U_2 - U_0) - \ln(U_3 - U_0) - \ln(U_4 - U_0)}{\ln(U_1 - U_0) - \ln(U_2 - U_0)}, \quad (5)$$

де $\{\Delta C_0\} = 0,5 \{|C_{01}\} - \{|C_{02}\}$.

Як видно з системи нелінійних рівнянь величин (4), отримані в кожному такті вимірювання напруги характеризують процес вимірювання різних за значенням концентрацій. Одночасно ці напруги містять в собі інформацію як про дійсне значення вимірюваних концентрацій так і інформацію про додаткові похибки вимірювання, що обумовлені відхиленнями значень параметрів функції перетворення вимірювального каналу від номінальних.

Проведемо розрахунок похибки вимірювання вологості прямим методом та методом надлишкових вимірювань при одних і тих же параметрах функції перетворення вимірювального каналу.

Припустимо, що номінальні значення параметрів були рівними: $S_{л} = 100$; $\Phi_0 = 0,05$ Вт; $a_b = 0,54$; $a_{ц} = 0,42$; $k_p = 0,04$; $l_e = 0,3$ мм; $\Delta U_{3м} = 0,001$ В. Якщо підставити ці значення у вираз (3), отримаємо значення напруги при заданому значенні вологості ДМ 7 %. Маємо $U_x = 3,385$ В.

Підставимо ці значення у (3) і отримаємо

$$C_x = \frac{\ln \frac{3,385}{100 \cdot 0,05} + (0,42 + 0,04) \cdot 0,3}{(0,42 - 0,54) \cdot 0,3} = \frac{-0,390 + 0,138}{-0,036} = 7,002\%$$

тобто практично ідеальне значення результату вимірювання з абсолютною похибкою 0,002 % за рахунок обчислення. Це забезпечується при відомих номінальних значеннях параметрів $S_{л}$, Φ_0 , $\Delta U_{3м}$, k_p і l_e .

Практично характер зміни параметрів функції перетворення у часі невідомий. Припустимо, що параметри функції перетворення вимірювального каналу в даний момент мають наступні значення: $S'_л = 98,3$; $\Phi'_0 = 0,051$ Вт; $k'_p = 0,039$; $l'_e = 0,301$ мм; $\Delta U'_{3м} = 0,0015$ В. З урахуванням відхилень параметрів від номінальних значень результат вимірювання вихідної

напруги вимірювального каналу отримано рівним $U'_x = 3,39$ В. Визначаємо, що

$$C'_x = \frac{\ln \frac{U'_x - \Delta U_{3M}}{S_{л} \Phi_0} + (k_p + a_{ц}) l_e}{(a_{ц} - a_{в}) l_e} = \frac{\ln \frac{3,39 - 0,0015}{103 \cdot 0,051} + (0,039 + 0,42) \cdot 0,301}{(0,42 - 0,54) \cdot 0,301} =$$

$$= \frac{\ln \frac{3,39 - 0,0015}{5,253} + 0,459 \cdot 0,301}{(0,42 - 0,54) \cdot 0,301} = \frac{-0,415 + 0,1381}{-0,03612} = 7,668\%.$$

У цьому випадку абсолютна похибка вимірювання становить $\Delta = |C'_x - C_x| = |7,668 - 7| = 0,668\%$,

а відносна

$$\delta = \frac{|C'_x - C_x|}{C_x} = \frac{|7,668 - 7|}{7} = 9,54\%.$$

На відміну від прямого методу вимірювання вологості, запропонований метод забезпечує вирішення поставленої технічної задачі без знання точних значень параметрів $S'_{л}$, Φ_0 , k_p , $a_{ц}$, l_e і $a_{в}$. Додатковою умовою є те, щоб за чотири такти вимірювання значення цих параметрів були постійними.

Визначимо значення вологості ДМ, що дає метод надлишкових вимірювань, при тих же значеннях параметрів функції перетворення вимірювального каналу. В якості стандартних було обрано два стандартні зразки листових матеріалів зі значеннями концентрацій вологості $C_{01} = 6\%$ та $C_{02} = 6,5\%$. Для визначення значення вологості C_x за (4), (5) визначаються значення вихідних напруг вимірювального каналу у кожному з чотирьох тактах вимірювання:

$$U_1 = 100 \cdot 0,05 e^{-(0,54 \cdot 6 + 0,42(1-6) + 0,04)0,3} + 0,001 = 5e^{-(3,24 - 2,1 + 0,04)0,3} + 0,001 = 3,5104 \text{ В},$$

$$U_2 = 100 \cdot 0,05 e^{-(0,54 \cdot 6,5 + 0,42(1-6,5) + 0,04)0,3} + 0,001 = 5e^{-(3,51 - 2,31 + 0,04)0,3} + 0,001 = 3,4478 \text{ В},$$

$$U_3 = 100 \cdot 0,05 e^{-(0,54(6+7) + 0,42(1-(6+7)) + 0,04)0,3} + 0,001 = 5e^{-(7,02 - 5,04 + 0,04)0,3} + 0,001 = 2,7286 \text{ В},$$

$$U_4 = 100 \cdot 0,05 e^{-(0,54(6,5+7) + 0,42(1-(6,5+7)) + 0,04)0,3} + 0,001 = 5e^{-(7,29 - 5,25 + 0,04)0,3} + 0,001 = 2,68 \text{ В},$$

Підставивши отримані значення у рівняння надлишкових вимірювань (5), отримаємо:

$$C_x = \Delta C_0 \cdot \frac{\ln((U_1 - U_0) \cdot (U_2 - U_0)) - \ln((U_3 - U_0) \cdot (U_4 - U_0))}{\ln \frac{U_1 - U_0}{U_2 - U_0}} =$$

$$= 0,25 \cdot \frac{\ln((3,5104 - 0,001) \cdot (3,4478 - 0,001)) - \ln((2,7286 - 0,001) \cdot (2,68 - 0,001))}{\ln \frac{3,5104 - 0,001}{3,4478 - 0,001}} =$$

$$= 0,25\% \cdot \frac{\ln((3,5094) \cdot (3,4468)) - \ln((2,7276) \cdot (2,679))}{\ln \frac{3,5094}{3,4468}} = 0,25\% \cdot \frac{2,493 - 1,989}{0,018} = 7\%,$$

або

$$\{C_x\} = \{\Delta C_0\} \cdot \frac{\ln \frac{N_4 - N_0}{N_1 - N_0} + \ln \frac{N_3 - N_0}{N_2 - N_0}}{\ln \frac{N_2 - N_0}{N_1 - N_0}} = 0,25\% \cdot \frac{\ln \frac{2,679}{3,5094} + \ln \frac{2,7276}{3,4468}}{\ln \frac{3,4468}{3,5094}} = 0,25\% \cdot \frac{0,27 + 0,2340}{0,018} = 7\%,$$

де N_0, N_1, N_2, N_3, N_4 – числові значення напруг U_0, U_1, U_2, U_3, U_4 відповідно,

У ідеальному випадку, при $\Delta C_0 = 0,5|6 - 6,5| = 0,25\%$ і значеннях напруг, відповідно, 3,5104 В; 3,4478 В; 2,7286 В; і 2,68 В маємо:

$$\{C_x\} = \{\Delta C_0\} \cdot \frac{\ln((N_4 - N_0) \cdot (N_3 - N_0)) - \ln((N_2 - N_0) \cdot (N_1 - N_0))}{\ln \frac{N_2 - N_0}{N_1 - N_0}} =$$

$$= 0,25\% \cdot \frac{\ln((7,307)) - \ln((12,096))}{\ln \frac{3,4468}{3,5094}} = 0,25\% \cdot \frac{-0,5041}{-0,018} = 7,0013\%.$$

Визначимо результат вимірювання вологості матеріалу для випадку, коли під дією

зовнішніх дестабілізуючих факторів параметри функції перетворення вимірювального каналу прийняли такі ж значення, що й при реалізації методу прямих вимірювань. В результаті отримуємо:

$$U'_1 = 103 \cdot 0,051e^{-(0,54 \cdot 6 + 0,42(1-6) + 0,039) \cdot 0,301} + 0,0015 = 5,253e^{-(3,24 - 2,1 + 0,039) \cdot 0,301} + 0,0015 = 3,685 \text{ В},$$

$$U'_2 = 103 \cdot 0,051e^{-(0,54 \cdot 6,5 + 0,42(1-6,5) + 0,039) \cdot 0,301} + 0,0015 = 5,253e^{-(3,51 - 2,31 + 0,039) \cdot 0,301} + 0,0015 = 3,619 \text{ В},$$

$$U'_3 = 103 \cdot 0,051e^{-(0,54(6+7) + 0,42(1-(6+7)) + 0,039) \cdot 0,301} + 0,0015 = 5,253e^{-(7,02 - 5,04 + 0,039) \cdot 0,301} + 0,0015 = 2,862 \text{ В},$$

$$U'_4 = 103 \cdot 0,051e^{-(0,54(6,5+7) + 0,42(1-(6,5+7)) + 0,039) \cdot 0,301} + 0,0015 = 5,253e^{-(7,29 - 5,25 + 0,039) \cdot 0,301} + 0,0015 = 2,811 \text{ В}.$$

Використовуючи рівняння надлишкових вимірювань (4) або рівняння числових значень та отримані значення напруг, концентрація вологості буде дорівнювати

$$C'_x = \Delta C_0 \cdot \frac{\ln((U_1 - U_0) \cdot (U_2 - U_0)) - \ln((U_3 - U_0) \cdot (U_4 - U_0))}{\ln \frac{U_1 - U_0}{U_2 - U_0}} =$$

$$= 0,25\% \cdot \frac{\ln((3,6845) \cdot (3,6185)) - \ln((2,8615) \cdot (2,8095))}{\ln \frac{3,6845}{3,6185}} = 0,25\% \cdot \frac{2,59 - 2,084}{0,018} = 7,028\%.$$

Абсолютна похибка вимірювання $\Delta = C'_x - C_x = 7,028 - 7 = 0,028\%$, а відносна $\delta = 100\% (C'_x - C_x) / C_x = 100\% (7,028 - 7) / 7 = 0,4\%$, тобто, у 23,8 разів менша, ніж для методу прямих вимірювань.

Припустимо, що усі параметри функції перетворення вимірювального каналу змінилися на 0,1% від номінального значення. Побудуємо графік ефективності методу надлишкових вимірювань у порівнянні із прямим методом вимірювання (див. рис. 1).

Аналіз отриманого графіка показав, що навіть при відхиленні параметрів на 0,1% від їх номінальних значень, ефективність методу надлишкових вимірювань вища у 20..160 разів.

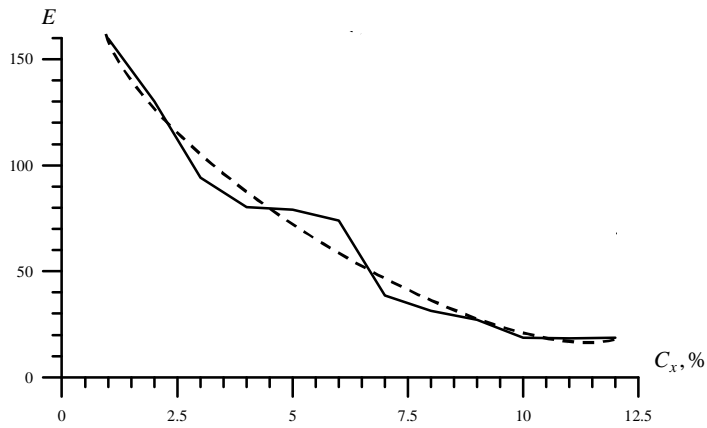


Рис. 1. Ефективність методу надлишкових вимірювань

Описаний метод надлишкових вимірювань може бути реалізований за допомогою цифрового вимірювача вологості, структурна схема якого представлена на рис. 2.

На рис. 2 використано наступні умовні позначення: ГОВ – кодокерований генератор оптичного випромінювання заданої довжини хвилі; Л – фокусуючі лінзи; ОВ – оптичні волокна; ДМ – досліджуваний матеріал; ЗМ – зразки оптично-прозорого листового матеріалу із відомою за значенням концентрації вологості; ПКП – перетворювач «код-переміщення»; Ш – шторки; М – модулятор потоку оптичного випромінювання, що складається, наприклад, із ірисової діафрагми Д та перетворювача «код-переміщення» ПКП2; ФП – фотоприймач; ВП – вибіркового підсилювач; СД – синхронний детектор (із фільтром нижніх частот); ЦВП – цифровий відліковий пристрій; МК – мікроконтролер із блоками оперативної та перепрограмованої постійної пам'яті.

Робота пристрою полягає у наступному. Після включення живлення приладу всі функціональні блоки встановлюються у початкове положення. По команді з мікроконтролера МК цифровий відліковий пристрій ЦВП обнуляється, а шторки Ш1-Ш5 встановлюються у початкове «закрите» положення, як показано на рис. 2.

Процес вимірювання вологості складається із чотирьох тактів вимірювання різних напруг, у які перетворені потужності послаблених потоків оптичного випромінювання, що пройшли через ДМ та стандартні зразки ЗМ1, ЗМ2 оптично-прозорого листового матеріалу і одного такту обробки результатів вимірювання. Окрім того, додатково проводиться такт вимірювання так званого зміщення нуля приладу.

Як видно з наведеної на рис. 2 функціональної схеми, ЦВВ складається із трьох оптичних каналів та одного електронного вимірювального каналу. Процес керування здійснюється за допомогою мікро-контролера МК із вбудованим АЦП. Перший оптичний канал складається із передавальних оптичних волокон ОВ1, що підводять потік оптичного випромінювання до ДМ, та приймальних оптичних волокон ОВ4, що відводять послаблений потік оптичного випромінювання від ДМ до лінзи Л2. Другий оптичний канал складається із

передавальних оптичних волокон ОВ2, що підводять потік оптичного випромінювання до зразка матеріалу ЗМ1, та приймальних оптичних волокон ОВ5, що відводять послаблений потік оптичного випромінювання від ЗМ1 до лінзи Л2. Третій оптичний канал складається із передавальних оптичних волокон ОВ3, що підводять потік оптичного випромінювання до зразка матеріалу ЗМ2, та приймальних оптичних волокон ОВ6, що відводять послаблений потік оптичного випромінювання від ЗМ2 до лінзи Л2.

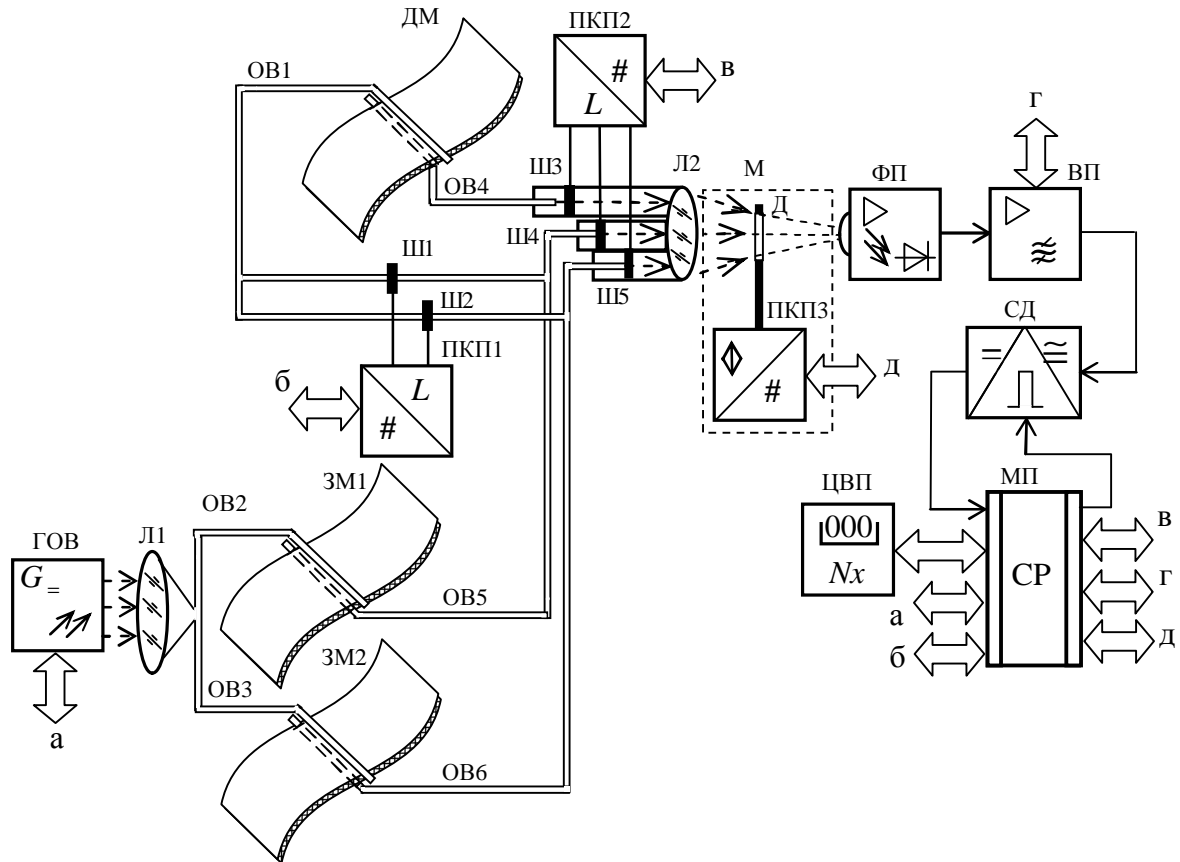


Рис. 2. Функціональна схема цифрового вимірювача вологості оптично-прозорих листових матеріалів (із використанням двох стандартних зразків)

У першому такті вимірюється вихідна напруга вимірювального каналу при нульовому значенні потужності потоку оптичного випромінювання на вході фотоприймача ФП. Усі шторки знаходяться у закритому стані, тобто на вхід фотоприймача ФП оптичне випромінювання не поступає. Проведення цього такту описується за допомогою першого рівняння у системі (4).

Вихідна напруга U_0 вимірювального каналу за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача (АЦП) перетворюється у код числа

$$N_0 = S_a U_0 + \Delta N_a, \quad (6)$$

де S_a і ΔN_a – крутизна перетворення та адитивна похибка АЦП, U_0 – напруга, яка у вигляді коду числа N_0 поступає у оперативну пам'ять мікроконтролера МК, де запам'ятовується.

У перший оптичний канал встановлюється ДМ, у другий – зразковий матеріал ЗМ1, у третій – зразковий матеріал ЗМ2. По команді з мікроконтролера МК на перетворювач ПКП2 подається сигнал, за яким шторка Ш4 встановлюється у відкритий стан. Всі інші шторки залишаються у попередньому стані.

У другому такті на генератор оптичного випромінювання ГОВ по команді з мікроконтролера МК подається напруга живлення $U_{ж1}$, за якою встановлюється задане значення потужності потоку Φ_0 оптичного випромінювання, наприклад, $\Phi_0 = 1 \text{ мВт}$, із довжиною хвилі $\lambda = 1,94 \text{ мкм}$. Діафрагма Д модулятора М по команді з мікроконтролера МК відкривається-закривається з певною частотою, що задається імпульсними сигналами з мікроконтролера МК.

Сформований потік Φ_0 оптичного випромінювання через лінзу Л1 за допомогою передавальних оптичних волокон ОВ2 підводиться до зразка оптично-прозорого листового матеріалу ЗМ1. Послаблений потік оптичного випромінювання, що пройшов через ЗМ1, за допомогою приймальних оптичних волокон ОВ5 відводиться до лінзи Л2. Далі потік оптичного випромінювання за допомогою модулятора М модулюється і потрапляє на вхід фотоприймача ФП. На виході фотоприймача ФП з'являється електричний сигнал змінної напруги, який

підсилюється вибірковою підсилювачем ВП, детектується у синхронному детекторі СД. Вихідна напруга U_1 за допомогою вбудованого АЦП перетворюється у код числа

$$N_1 = S_a U_1 + \Delta N_a \quad (7)$$

та поступає у оперативну пам'ять мікроконтролера МК. Проведення цього такту описується за допомогою другого рівняння у системі рівнянь (4).

Оскільки коефіцієнти передачі сигналів оптичними каналами в загальному випадку не рівні між собою, як і не рівні між собою довжини оптичних волокон, то загальні коефіцієнти передачі будуть відрізнятися між собою. Для досягнення рівності коефіцієнтів передачі каналів (при відсутності оптично-прозорого листового матеріалу) у кожному такті встановлюються різні коефіцієнти підсилення вибіркового підсилювача ВП. Це здійснюється на етапі калібрування каналів.

У третьому такті по команді з мікроконтролера МК на перетворювач «код-переміщення» ПКП2 подається сигнал, за яким шторка Ш4 встановлюється у закриті, а шторка Ш5 у відкрите положення. Всі інші шторки знаходяться у закритому стані. Сформований потік Φ_0 оптичного випромінювання пропускається через зразок оптично-прозорого листового матеріалу ЗМ2. Цей такт проводиться аналогічно другому такту. На виході вимірювального каналу з'являється напруга U_2 , яка за допомогою АЦП перетворюється у код числа

$$N_2 = S_a U_2 + \Delta N_a \quad (8)$$

та поступає у оперативну пам'ять мікроконтролера МК. Проведення цього такту описується за допомогою третього рівняння у системі рівнянь (4).

У четвертому такті по командам з мікроконтролера МК на перетворювачі ПКП1 і ПКП2 подаються сигнали, за якими шторки Ш1 і Ш3 встановлюються у відкритий стан, а шторки Ш4 і Ш5 у закритий стан. Сформований потік Φ_0 оптичного випромінювання пропускається через зразок оптично-прозорого листового матеріалу ЗМ1. Вихідний послаблений потік Φ_{01} оптичного випромінювання додатково пропускається через ДМ. Оптичні волокна ОВ4 відводять послаблений потік до лінзи Л2, де послаблений потік модулюється за допомогою модулятора М. Модульований потік оптичного випромінювання поступає на вхід фотоприймача ФП. Вихідний сигнал ФП підсилюється у вибірковою підсилювачі, детектується за допомогою синхронного детектора СД. В результаті на виході вимірювального каналу з'являється напруга U_3 , яка за допомогою АЦП перетворюється у код числа

$$N_3 = S_a U_3 + \Delta N_a \quad (9)$$

Останній також запам'ятовується у оперативній пам'яті мікроконтролера МК. Проведення цього такту описується за допомогою четвертого рівняння у системі рівнянь (4).

У п'ятому такті процес вимірювання проводиться аналогічно до четвертого такту. По команді з мікроконтролера МК шторка Ш2 встановлюється у відкритий стан, шторка Ш1 – у закритий. Всі інші шторки не змінюють свого положення, тобто шторка Ш3 залишається у відкритому стані, а шторки Ш4, Ш5 – у закритому. Сформований потік Φ_0 оптичного випромінювання пропускається через зразок оптично-прозорого листового матеріалу ЗМ2. Вихідний послаблений потік Φ_{02} оптичного випромінювання додатково пропускається через ДМ. Оптичні волокна ОВ4 відводять послаблений потік до лінзи Л2, де послаблений потік модулюється за допомогою модулятора М. Модульований потік поступає на вхід фотоприймача ФП. Вихідний сигнал ФП підсилюється у вибірковою підсилювачі ВП, а потім детектується за допомогою синхронного детектора СД. В результаті на виході вимірювального каналу з'являється напруга U_4 . За допомогою АЦП ця напруга перетворюється у код числа

$$N_4 = S_a U_4 + \Delta N_a \quad (10)$$

який поступає у оперативну пам'ять мікроконтролера МК. Проведення цього такту описується за допомогою п'ятого рівняння у системі рівнянь (4).

Після проведення всіх тактів вимірювання здійснюється обробка результатів проміжних перетворень за рівнянням числових значень

$$N_{Сх} = \{\Delta C_0\} \frac{\ln(N_1 - N_0) + \ln(N_2 - N_0) - \ln(N_3 - N_0) - \ln(N_4 - N_0)}{\ln(N_1 - N_0) - \ln(N_2 - N_0)} \quad (11)$$

Запропонований цифровий вимірювач вологості оптично-прозорих листових матеріалів, структурна схема якого представлена на рис. 2, забезпечує виключення всіх систематичних похибок результату вимірювання, у тому числі і похибок АЦП. Похибка визначення дійсного значення вологості оптично-прозорого залежить лише від похибок відтворення зразків матеріалів заданої вологості.

Висновки

В роботі описаний метод надлишкових вимірювань вологості оптично-прозорих листових матеріалів при лінійній функції перетворення вимірювального каналу.

Наведено один з варіантів технічної реалізації ЦВВ на базі стандартних блоків та вузлів.

Показано, що використання двох зразків оптично-прозорого листового матеріалу і, як наслідок, виключення необхідності їх заміни протягом усього часу вимірювання протягом робочої зміни, підвищує швидкодію процесу вимірювання, оскільки немає необхідності заміни одного зразка на інший.

Показано, що не зважаючи на наявність трьох оптичних каналів, досягається висока точність вимірювання. Розрахункова похибка складає $\pm 0,014\%$.

Оцінена ефективність методу надлишкових вимірювань відносно прямого методу вимірювання. Отримані результати показали високу ефективність описаного методу надлишкових вимірювань. Зменшення похибки вимірювання склало від 20 до 150 разів.

Встановлено, що функція ефективності зменшення похибок вимірювання нелінійно залежить від абсолютного значення вологості оптично-прозорого матеріалу. При малих значеннях вологості вона зростає, а при великих – спадає.

Вважаємо, що надлишкові вимірювання вологості оптично-прозорих листових матеріалів є найбільш перспективними з існуючих методів.

Література

1. Мухитдинов М., Мусаев Э. С. Оптические методы и устройства контроля влажности. – М.: Энерго-атомиздат, 1986. – 96 с.: , ил. – (Б-ка по автоматике; Вып. 662).
2. Фляте Д.М., Каган М.Р. Влияние температуры сушки на пористость бумаги // Бумажная промышленность. – 1971. – № 9. – С. 7-8.
3. Аликин В.П. Физико-химические свойства природных целлюлозных волокон. – М.: Лесная промышленность, 1969, 328с.
4. Буйлов Г.П. и др. Основы автоматизации производственных процессов целлюлозно-бумажной промышленности. – Л.: Изд. Ленингр. Университета, 1983. – 264 с.
5. Буйлов Г.П. и др. Автоматический контроль и управление процессами сушки бумаги, картона и целлюлозы на картонно-делательных и сушильных машинах. – М.: Энергия, 1986. – 288 с.
6. Вайсман Л.М. Структура бумаги и методы ее контроля. – М. Лесная промышленность, 1973. – 150 с.
7. Козаровицкий Л.А. Бумага и краска в процессе печатания. – М.: Книга, 1965. – 368 с.
8. Фляте Д.М. Свойства бумаги. – М.: Лесная промышленность, 1970. – 458 с.
9. Кондратов В.Т., Пасько О.О., Сорокіна Л.О. Термогравіметричний метод надлишкових вимірювань вологості продуктів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2006
10. Кондратов В.Т., Сорокіна Л.А. Избыточные измерения влажности оптически прозрачных листовых материалов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2006.
11. Сорокіна Л.О. Аналіз похибок надлишкових вимірювань вологості оптично прозорих листових матеріалів // Вісник хмельницького національного університету. – 2007.

Надійшла до редакції
11.11.2009 р.

УДК 621.852 (043)

О.О. Овчинніков

Хмельницький національний університет

РОЗРАХУНОК СПРЯЖЕНОГО ПРОФІЛЮ ЗУБЦІВ ШКІВА

В результаті проведеного теоретичного дослідження були одержані математичні залежності для розрахунку спряженого профілю зубців паса які дозволяють за рахунок варіювання геометричних параметрів зубців шківа одержати профіль зубців паса, який задовольняє основному закону зачеплення і виявлені параметри які не впливають на характер профілю зубців.

As a result of the carried out (spent) theoretical research the mathematical dependences for definition of the connected structure of teeth of a belt which were received permit at the expense of a variation of geometrical parameters of teeth of a pulley to receive a structure of teeth of a belt, which satisfies to the basic law of gearing and the revealed parameters which do not influence character of a structure of teeth.

Ключові слова: спряжений профіль зубців паса, закон зчеплення.

Зубчасто-пасові передачі є перспективним видом гнучкого зв'язку, завдяки досить високій тяговій здатності і коефіцієнту корисної дії. Передачі цього типу працюють без змащення, стійкі до дії абразивних і агресивних середовищ, здатні синхронізувати рух вхідної і вихідної ланок, прості в експлуатації, і тому можлива область їхнього використання достатньо широка, вони використовуються майже у всіх галузях промисловості. Такі передачі