

## НАДЛИШКОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ ПАПЕРУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ДВОКАНАЛЬНОГО ШИРОКОДІАПАЗОННОГО ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ЗАСОБУ

Стаття присвячена аналізу та опису надлишкового методу вимірювального контролю вологості паперу із автоматичною корекцією похибок у широкому діапазоні вимірюваних значень із використанням двоканального оптико-електронного засобу.

**Ключові слова:** надлишковий метод, цифровий вимірювач, вологість паперу.

L.O. KOVTUN, D.M. MEDZATYI  
Khmelnitskyi National University

### METHOD OF MEASURING EXCESS HUMIDITY CONTROL PAPER WITH WIDE-RANGE TWO-CHANNEL OPTO-ELECTRONIC DEVICE

This article analyzes and descriptions of surplus measurement control method of paper with automatic correction of errors in a wide range of values measured using dual-channel opto-electronic device. The method of the surplus measuring of paper humidity that consist in determination of value of paper humidity after implementation of 8 measuring times of voltage values have been offered, that contain information about humidity of paper standard with rationed by concentration value humidity and prospected paper. Determination of actual humidity value is made by equation of the surplus measuring, that is solving of the system of nonlinear size equations. As a result of the use of methods of the surplus measuring there is the automatic diminishing and even exception of systematic measuring errors. The use of the real function of transformation of measuring channel allowed expansion of the measuring range of paper humidity. Application of the method of the surplus measuring allowed getting a measuring result with proportional error to the recreation error of humidity concentration value of exemplary measure.

**Keywords:** surplus method, digital meter, humidity paper.

**Вступ.** Вимірювання вологості паперу є важливим параметром, оскільки вміст її навіть у невеликій кількості значно впливає на фізичні властивості – теплові, оптичні, механічні, електрофізичні та інші. Високоточному контролю вологості паперу приділяється велика увага з боку вчених та спеціалістів. Одним із перспективних напрямів безконтактного та заводостійкого вимірювального контролю є оптична вологометрія [1].

Перевагами існуючих автоматизованих методів вимірювального контролю є широкий діапазон вимірювання вологості паперу, швидкодія, можливість повної автоматизації процесу вимірювання. Недоліками існуючих методів є залежність результатів вимірювання від часової та температурної нестабільності параметрів функції перетворення (ФП) вимірювального каналу (ВК), вплив коефіцієнта розсіювання та коефіцієнтів поглинання води та целюлози на результат вимірювання, складність конструкції тощо.

У теперішній час поряд із прямими та непрямими методами стали використовувати й надлишкові методи вимірювального контролю із автоматичною корекцією похибок [2]. Підвищення точності вимірювання та вірогідності вимірювального контролю вологості паперу є й досі актуальною задачею [3].

**Основна частина.** Сутність та переваги оптико-електронного методу надлишкових вимірювань (НВ) вологості опишемо на прикладі роботи цифрового оптико-електронного засобу вимірювального контролю, функціональна схема якого наведена на рис. 1.

Запропонований оптико-електронний засіб містить: генератор оптичного випромінювання ГОВ, два волоконно-оптичні сенсори вологості, що включають в себе перші ОВ1 та другі ОВ2 оптичні волокна, що підводять потік ОВ до листового матеріалу, та перше ОВ3 і друге ОВ4 оптичні волокна, що відводять послаблений потік ОВ від матеріалу, мікроконтролер МК. Вимірювальний канал включає в себе послідовно з'єднані між собою фотоприймач ФПр, оптичні входи якого з'єднуються через отвір у обтюраторному диску ОД, що жорстко з'єднаний з синхродвигуном СДв, оптично з'єднаний з лінзою ЛЗ. Також містить вибіркового підсилювач ВП, синхронний детектор СДр та аналого-цифровий перетворювач АЦП, виходи якого підключені до першого порту мікроконтролера МК.

У структурну схему засобу вимірювального контролю додатково введені перша Ш1 і друга Ш2, третя Ш3 і четверта Ш4 шторки, що жорстко з'єднані, відповідно, з другим ПКП2 і третім ПКП3 перетворювачами „код-переміщення”, цифрові входи яких підключені до другого та третього портів мікроконтролера МК. Також запропонований засіб містить першу напівпрозору пластину НПП1, що жорстко з'єднана з першим ПКП1 перетворювачем „код-переміщення”, вхід керування якого підключено до четвертого порту мікроконтролера МК, першу П1 та другу П2 трикутні призми, фокусуєчі лінзи Л1 та Л2. Додатково введено другу НПП2 та третю НПП3 напівпрозорі пластини, третій та четвертий волоконно-оптичні сенсори. Вхідні торці передавальних оптичних волокон ОВ5 та ОВ6 третього та четвертого волоконно-оптичних сенсорів оптично з'єднані через другу НПП2 та третю НПП3 напівпрозорі пластини з вихідними торцями приймальних оптичних волокон першого та другого оптичних каналів відповідно.

Вихідні торці приймальних оптичних волокон ОВ7 та ОВ8 третього та четвертого волоконно-оптичних сенсорів, як і виходи другої НПП2 та третьої НПП3 напівпрозорих пластин, оптично з'єднані через відповідні шторки з першою Л1 та другою Л2 лінзами, виходи яких оптично з'єднані через дев'яте ОВ9 та десяте ОВ10 оптичні волокна, грані другої трикутної призми П2, третю фокусуючу лінзу Л3 та отвір у обтюраторному диску ОД з оптичним входом фотоприймача ФПр.

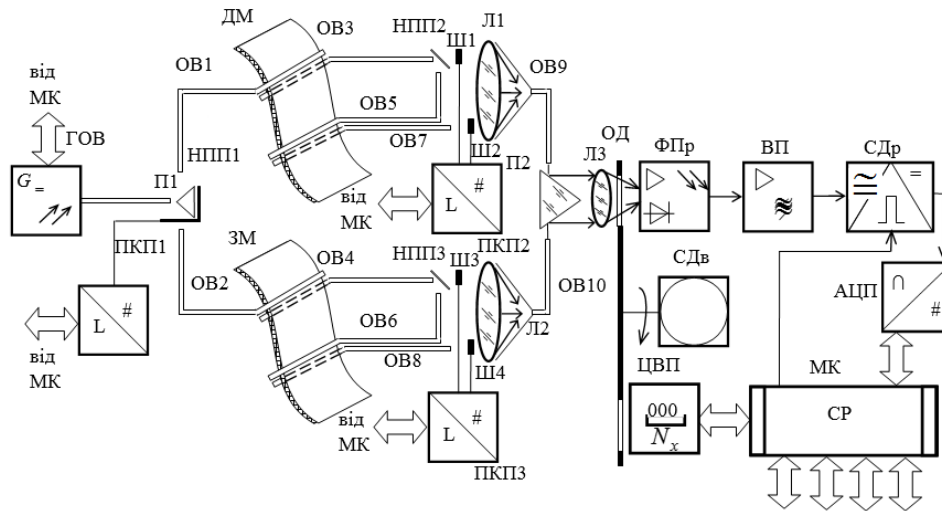


Рис. 1. Функціональна схема двоканального широкодіапазонного оптико-електронного засобу вимірювального контролю вологості паперу

Грані першої трикутної призми П1 оптично з'єднані через першу напівпрозору пластину НПП1 з виходом генератора оптичного випромінювання ГОВ та першими і другими торцями передавальних оптичних волокон ОВ1 та ОВ2 першого та другого волоконно-оптичних сенсорів відповідно. При цьому перша Ш1 і друга Ш2, третя Ш3 і четверта Ш4 шторки розташовані на оптичних осях, відповідно, між другою напівпрозорою пластинною НПП2 і торцем приймальних оптичних волокон ОВ7 третього оптичного каналу, третьою напівпрозорою пластинною НПП3 і торцем приймальних оптичних волокон ОВ8 четвертого оптичного каналу – з одного боку, і першою Л1 і другою Л2 фокусуючими лінзами – з другого боку.

В результаті попередніх досліджень було встановлено, що на відміну від лінійної ФП ВК, створення математичної моделі (ММ) з реальними (нелінійними) ФП ВК з ФПр на вході ВК, забезпечують розширення динамічного діапазону вимірювання концентрації листового матеріалу. Логарифмічна ФП ВК в цілому описується нелінійним рівнянням величин виду:

$$U_x = S'_H \ln(\Phi_\Sigma / \Phi_S) + \Delta U_{3M}, \quad (1)$$

де  $U_x$  – напруга, у яку перетворено послаблений потік оптичного випромінювання,  $S'_H$  – реальна крутизна перетворення нелінійної складової ФП ВК,  $\Phi_S$  – темновий потік,  $\{\Phi_\Sigma\} = \{\Phi_S\} + \{\Phi_x\}$ ,  $\Delta U_{3M}$  – напруга зміщення фотоприймача.

Враховуючи те, що поглинання потоку ОВ відбувається за законом Бугера-Ламберта-Бера, то (1) перепишеться наступним чином:

$$U_x = S'_H \ln \left( \left( \Phi_0 e^{-(\alpha_B C_x + \alpha_C (C_\Sigma - C_x) + k_p) l_e} + \Phi_S \right) / \Phi_S \right) + \Delta U_{3M} \quad (2)$$

де  $\Phi_0$  – нормований за значенням потужності потік оптичного випромінювання;  $\alpha_B$  – показник поглинання води на довжині хвилі  $\lambda_0$ ;  $\alpha_C$  – показник поглинання матеріалу на довжині хвилі  $\lambda_0$ ;  $C_x$  – концентрація води, що контролюється;  $C_\Sigma$  – загальна концентрація;  $k_p$  – показник розсіювання;  $l_e$  – ефективна товщина матеріалу невідомої вологості.

Оскільки ФПр має логарифмічну ФП, то найбільшу цікавість представляють ММ, що описують методи НВ при логарифмічній ФП ВК, виду (рис. 2, рис. 3):

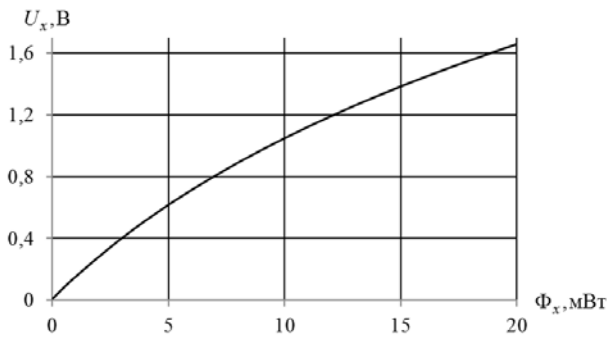


Рис. 2. Графік логарифмічної ФП ВК

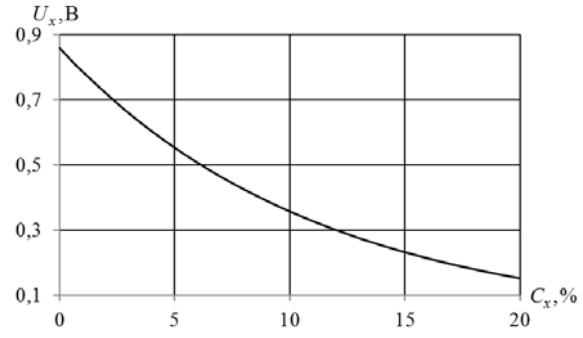


Рис. 3. Графік реальної ФП ВК

Використання логарифмічної ФП ВК забезпечує роботу ВК у всьому діапазоні вхідних сигналів ФПр і дає можливість створити приймач без перемикання діапазону вимірюваних значень концентрацій вологості матеріалу. Тому ММ методів, які використовуються при логарифмічній ФП ВК представляють найбільшу цікавість. Розглянемо більш детально одну з них. ММ складається із системи надлишкових рівнянь

$$\left. \begin{aligned}
 U_0 &= S'_H \ln\left(\frac{\Phi_{00} + \Phi_S}{\Phi_S}\right) + \Delta U_{3M}; \\
 U_1 &= S'_H \ln\left(\frac{\left(\Phi_0 e^{-(\alpha_B C_{01} + \alpha_U (C_\Sigma - C_{01}) + k_p)}\right) e + \Phi_S}{\Phi_S}\right) + \Delta U_{3M}; \\
 U'_1 &= 2U_1 = S'_H \ln\left(\frac{\left(k_\Phi \Phi_0 e^{-(\alpha_B C_{01} + \alpha_U (C_\Sigma - C_{01}) + k_p)}\right) e + \Phi_S}{\Phi_S}\right) + \Delta U_{3M}; \\
 U_2 &= S'_H \ln\left(\frac{\left(\Phi_0 e^{-(\alpha_B C_{01} + \alpha_U (C_\Sigma - C_{01}) + k_p)}\right) 2l_e + \Phi_S}{\Phi_S}\right) + \Delta U_{3M}; \\
 U_3 &= S'_H \ln\left(\frac{\left(\Phi_0 e^{-(\alpha_B C_{02} + \alpha_U (C_\Sigma - C_{02}) + k_p)}\right) e + \Phi_S}{\Phi_S}\right) + \Delta U_{3M}; \\
 U_4 &= S'_H \ln\left(\frac{\left(\Phi_0 e^{-(\alpha_B C_{02} + \alpha_U (C_\Sigma - C_{02}) + k_p)}\right) 2l_e + \Phi_S}{\Phi_S}\right) + \Delta U_{3M}; \\
 U_5 &= S'_H \ln\left(\frac{\left(\Phi_0 e^{-(\alpha_B C_x + \alpha_U (C_\Sigma - C_x) + k_p)}\right) e + \Phi_S}{\Phi_S}\right) + \Delta U_{3M}; \\
 U_6 &= S'_H \ln\left(\frac{\left(\Phi_0 e^{-(\alpha_B C_{01} + \alpha_U (C_\Sigma - C_{01}) + k_p)}\right) 2l_e + \Phi_S}{\Phi_S}\right) + \Delta U_{3M},
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

та рівняння надлишкових вимірювань, яке є розв'язком запропонованої системи.

$$C_x = C_{01} - (C_{01} - C_{02}) \frac{\ln\left(\frac{k_1 - k_\Phi}{k_\Phi}\right)^{\frac{U_5 - U_0}{U_1 - U_0}} + \ln\left(\frac{k_1 - k_\Phi}{k_\Phi}\right)^{\frac{U_6 - U_0}{U_1 - U_0}} - \ln\left(\frac{k_1 - k_\Phi}{k_\Phi}\right)^{\frac{U_2 - U_0}{U_1 - U_0}} - \ln\left(\frac{k_1 - k_\Phi - k_2}{k_\Phi}\right)}{\ln\left(\frac{k_1 - k_\Phi}{k_\Phi}\right)^{\frac{U_3 - U_0}{U_1 - U_0}} + \ln\left(\frac{k_1 - k_\Phi}{k_\Phi}\right)^{\frac{U_4 - U_0}{U_1 - U_0}} - \ln\left(\frac{k_1 - k_\Phi}{k_\Phi}\right)^{\frac{U_2 - U_0}{U_1 - U_0}} - \ln\left(\frac{k_1 - k_\Phi - k_2}{k_\Phi}\right)}, \quad (4)$$

де  $k_1 = 1, k_2 = 2$ .

Оптико-електронний засіб, який реалізує метод НВ за наведеною ММ, працює наступним чином.

Після ввімкнення джерела живлення усі функціональні блоки засобу встановлюються у вихідне положення. По команді з мікроконтролера МК на генератор оптичного випромінювання ГОВ подається сигнал, за яким формується потік ОВ заданої потужності, який розділяється прямокутною призмою П1. Потік через передавальне оптичне волокно ОВ2 подається на зразок листового матеріалу ЗМ із відомою за значенням концентрації  $C_0$ , який встановлено у другому оптичному каналі та через передавальне оптичне волокно ОВ1 на ДМ з невідомою за значенням концентрації  $C_x$  вологістю у першому оптичному каналі. За допомогою приймальних оптичних волокон ОВ3 та ОВ4 відповідно послаблені потоки поступають почергово на фокусуючі лінзи Л1 та Л2 відповідно, за допомогою яких вони фокусуються. Використання напівпрозорих пластин НПП2 та НПП3, які оптично з'єднані з вихідними торцями приймальних світловодів першого та другого сенсорів відповідно, дозволяє пропустити повторно крізь матеріали послаблені потоки оптичного випромінювання. Отримані потоки за допомогою передавальних оптичних волокон ОВ5 та ОВ6 підводяться до зразка матеріалу ЗМ з нормованою за значенням концентрації  $C_0$  вологістю та до ДМ з

невідомою за значенням концентрації  $C_x$  вологістю відповідно. За допомогою приймальних оптичних волокон ОВ7 та ОВ8 четвертого та третього оптичних сенсорів, відводяться до фокусуєчих лінз Л1 та Л2 відповідно, за допомогою яких фокусуються. По команді з мікроконтролера МК послаблені потоки ОВ відокремлюються один від одного за допомогою непрозорих шторок Ш1, Ш2, Ш3, Ш4, які жорстко з'єднані із перетворювачами «код-переміщення» ПКП2 та ПКП3 і закриваються або відкриваються сигналом з мікроконтролера МК. По черзі на фотоприймач ФПр потрапляють послаблені потоки ОВ, які перед цим промодульовані модулятором, який містить обтюраторний диск ОД, який жорстко закріплений із синхродвигуном СДв, у результаті чого формуються імпульси з певною частотою, значення якої задається сигналом з мікроконтролера МК. Почергово прийняті фотоприймачем ФПр потоки потрапляють на вибіркоковий підсилювач ВП, за допомогою якого потоки підсилюються і далі потрапляють на синхронний детектор СДр з фільтром нижніх частот. За допомогою аналого-цифрового перетворювача АЦП отримуємо кодову комбінацію, яка у мікроконтролері МК обробляється за рівнянням надлишкових вимірювань. Результат виводиться на дисплей цифрового відлікового пристрою ЦВП.

У першому такті на вхід генератора оптичного випромінювання ГОВ сигнал, за яким встановлюється певне значення потужності потоку ОВ  $\Phi_0$ , не подається. На вхід фотоприймача ФПр потік ОВ не поступає. В результаті на виході ВК з'явиться напруга  $U_0$  зміщення нуля ВК, яка за допомогою аналого-цифрового перетворювача АЦП перетворюється у код числа  $N_0$ , отримане значення вимірюється та запам'ятовується у пам'яті мікроконтролера МК. Значення напруги виводиться на цифровий вимірювальний пристрій ЦВП.

У другому такті по команді з мікроконтролера МК формують нормований за значенням потужності потоку ОВ  $\Phi_0$ . Між передавальним ОВ1 та приймальним ОВ3 оптичними волокнами, та передавальними ОВ5 та приймальними ОВ7 оптичними волокнами першого оптичного каналу встановлюють зразок листового матеріалу з нормованою за значенням концентрації  $C_{01}$  вологістю і пропускають через нього сформований потік ОВ  $\Phi_0$ . По команді з мікроконтролера МК на перетворювач «код-переміщення» ПКП3 шторки Ш3 та Ш4 встановлюються у стан, при якому на фотоприймач ФПр з другого оптичного каналу потік ОВ не поступає, а на перетворювач «код-переміщення» ПКП2 подається сигнал, за яким шторки Ш1 та Ш2 встановлюються у стан, при якому з виходу торців першого сенсора потік ОВ на вхід фотоприймача ФПр поступає, а з виходу торців третього сенсора – не поступає. В результаті на виході вимірювального каналу отримуємо напругу  $U_1$ , яка за допомогою аналого-цифрового перетворювача АЦП перетворюється у код числа  $N_1$ . Отримане значення вимірюється та запам'ятовується у пам'яті мікроконтролера МК.

У третьому такті по команді з мікроконтролера МК на генератор оптичного випромінювання ГОВ подається сигнал, за яким потужність потоку ОВ  $\Phi_0$  змінюється у  $k_\Phi$  разів. Зміна потужності потоку ОВ відбувається до появи на виході ВК напруги, значення якої рівне  $U'_1 = 2 \cdot U_1$ . Значення коефіцієнта  $k_\Phi$  вимірюється і запам'ятовується у пам'яті мікроконтролера МК.

У четвертому такті по команді з мікроконтролера МК на перетворювач «код-переміщення» ПКП2 шторки Ш1 та Ш2 змінюють своє положення на протилежне, тобто з виходу другого сенсора на фотоприймач ФПр потік ОВ не поступає, а з виходу четвертого сенсора – поступає. Шторки Ш3 та Ш4 лишаються у тому стані, що й попередньому такті, тобто з виходу другого оптичного каналу на фотоприймач ФПр потік ОВ не поступає. По команді з мікроконтролера відтворюється потік ОВ  $\Phi_0$  і пропускається через встановлений у першій оптичний канал зразок листового матеріалу. Послаблений потік ОВ  $\Phi'_0$  з виходу першого оптичного сенсора відбивається від напівпрозорої пластини НПП2. Через передавальні ОВ5 оптичні волокна потік ОВ  $\Phi'_0$  підводиться повторно до зразка листового матеріалу із нормованою за значенням концентрації  $C_{01}$  вологістю. Приймальні оптичні волокна ОВ7 відводять додатково послаблений потік ОВ  $\Phi'_0$  до фокусуєчої лінзи Л1. На вхід вимірювального каналу поступає додатково послаблений потік ОВ. В результаті на виході вимірювального каналу отримуємо напругу  $U_2$ , яка за допомогою аналого-цифрового перетворювача АЦП перетворюється у код числа  $N_2$ . Отримане значення напруги вимірюється та запам'ятовується у пам'яті мікроконтролера МК.

У п'ятому такті по команді з мікроконтролера МК напівпрозора пластинка НПП1 встановлюється між генератором оптичного випромінювання ГОВ та прямокутною призмою П1. В результаті потужність потоку ОВ  $\Phi_0$  зменшиться у  $k$  разів і з'явиться потік ОВ  $\Phi_{01}$ . Проведення цієї дії відповідає зміні концентрації до значення  $C_{02}$ , яке визначається по початку вимірювального контролю. Шторки Ш1 та Ш2 встановлюються аналогічно тому, як були встановлені у другому такті, тобто з виходу першого сенсора на фотоприймач ФПр поступає потік ОВ, а третього – не поступає. Потік ОВ  $\Phi_{01}$  пропускається через зразок матеріалу з нормованою за значенням концентрації  $C_{01}$  вологістю. В результаті на виході ВК з'явиться напруга  $U_3$ , яка за допомогою аналого-цифрового перетворювача АЦП перетворюється у код числа  $N_3$ . Отримане значення вимірюється та запам'ятовується у пам'яті мікроконтролера МК.

У шостому такті послаблений потік ОВ  $\Phi'_0$  відбитий від напівпрозорої пластини НПП2, знову пропускається через зразок матеріалу з нормованою за значенням концентрації  $C_{01}$  вологістю. Шторки Ш1 та Ш2 встановлюються аналогічно тому, як були встановлені у третьому такті, тобто з виходу першого сенсора на фотоприймач ФПр потік ОВ не поступає, а з виходу третього сенсора – поступає. В результаті на виході ВК з'являється напруга  $U_4$ , яка за допомогою аналого-цифрового перетворювача АЦП перетворюється у код числа  $N_4$ . Отримане значення вимірюється і запам'ятовується у пам'яті мікроконтролера МК.

У сьомому такті по команді з мікроконтролера напівпрозора пластинка НПП1 встановлюється у стан, при якому відтворюється нормований за значенням потужності потік ОВ  $\Phi_0$ . По команді з мікроконтролера МК на перетворювач «код-переміщення» шторки Ш1 та Ш2 встановлюються у стан, при якому на фотоприймач ФПр потік ОВ з другого оптичного каналу не поступає, на перетворювач «код-переміщення» ПКПЗ подається сигнал, за яким шторки Ш3 та Ш4 встановлюються у стан, при якому з виходу другого сенсора на фотоприймач ФПр потік ОВ поступає, а з виходу четвертого сенсора – не поступає. Сформований потік ОВ  $\Phi_0$  пропускається через ДМ, який встановлено у другому оптичному каналі. В результаті на виході ВК з'являється напруга  $U_5$ , яка за допомогою аналого-цифрового перетворювача АЦП перетворюється у код числа  $N_5$ . Отримане значення вимірюється та запам'ятовується у пам'яті мікроконтролера МК.

У восьмому такті послаблений потік ОВ  $\Phi'_0$  відбитий від напівпрозорої пластини НПП3 через передавальне оптичне волокно ОВ6 підводиться до ДМ. Приймальні оптичні волокна ОВ8 відводять додатково послаблений потік ОВ  $\Phi''_0$  від ДМ. По команді з мікроконтролера МК на перетворювач «код-переміщення» ПКПЗ шторки Ш3 та Ш4 встановлюються у стан, при якому з виходу другого сенсора на фотоприймач ФПр потік ОВ не поступає, а з виходу четвертого сенсора – поступає. В результаті на виході ВК отримують напругу  $U_6$ , яка за допомогою аналого-цифрового перетворювача перетворюється у код числа  $N_6$ . Отримане значення вимірюється та запам'ятовується у пам'яті мікроконтролера МК.

Отримані значення проміжних вимірювань  $N_0, N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6, \{k_{\Phi}\}$  обробляються згідно із рівнянням числових значень

$$N_{C_x} = (C_{01}) - ((C_{01}) - (C_{02})) \frac{\ln \left( \left( \frac{k_1 - \{k_{\Phi}\}}{\{k_{\Phi}\}} \right)^{\frac{N_5 - N_0}{N_1 - N_0}} - k_1 \right) + \ln \left( \left( \frac{k_1 - \{k_{\Phi}\}}{\{k_{\Phi}\}} \right)^{\frac{N_6 - N_0}{N_1 - N_0}} - k_1 \right) - \ln \left( \left( \frac{k_1 - \{k_{\Phi}\}}{\{k_{\Phi}\}} \right)^{\frac{N_2 - N_0}{N_1 - N_0}} - k_1 \right) - \ln \left( \left( \frac{k_1 - \{k_{\Phi}\}}{\{k_{\Phi}\}} \right) - k_2 \right)}{\ln \left( \left( \frac{k_1 - \{k_{\Phi}\}}{\{k_{\Phi}\}} \right)^{\frac{N_3 - N_0}{N_1 - N_0}} - k_1 \right) + \ln \left( \left( \frac{k_1 - \{k_{\Phi}\}}{\{k_{\Phi}\}} \right)^{\frac{N_4 - N_0}{N_1 - N_0}} - k_1 \right) - \ln \left( \left( \frac{k_1 - \{k_{\Phi}\}}{\{k_{\Phi}\}} \right)^{\frac{N_2 - N_0}{N_1 - N_0}} - k_1 \right) - \ln \left( \left( \frac{k_1 - \{k_{\Phi}\}}{\{k_{\Phi}\}} \right) - k_2 \right)} \quad (5)$$

Результуюче значення напруги висвітлюється на цифровому табло цифрового вимірювального пристрою ЦВП.

Отже, використовуючи запропонований засіб реалізовано метод вимірювального контролю при логарифмічній ФП ВК, згідно з яким вологість ДМ визначається за рівнянням НВ (4), яке використовується у якості рівняння числових величин (5).

Як вище було зазначено, рівняння вимірювального перетворення при логарифмічній ФП ВК записується у вигляді (2). Для приведення зміни вихідної напруги  $U_x$  в діапазон зміни вхідного сигналу АЦП необхідно значення цієї напруги підсилити в  $k_U$  разів вибірково підсилювачем [4, 5]

$$U_{ADC} = k_U \cdot U_x = k_U \left( S'_H \ln \left( \left( \Phi_0 e^{-\left( \alpha_B C_x + \alpha_{II} (C_{\Sigma} - C_x) + k_p \right)} e + \Phi_S \right) / \Phi_S \right) + \Delta U_{3M} \right) \quad (6)$$

В результаті аналого-цифрового перетворення за алгоритмом послідовного наближення чи порозрядного зрівноваження, отримаємо

$$N_{U_x} = \frac{U_{ADC}}{U_0} 2^n \quad (7)$$

де  $n$  – розрядність регістра послідовного наближення,  $U_0$  – значення опорної напруги.

Підставивши (6) та (7) отримаємо остаточне рівняння перетворення

$$N_{U_x} = k_U 2^n \frac{S'_H \ln \left( \left( \Phi_0 e^{-\left( \alpha_B C_x + \alpha_{II} (C_{\Sigma} - C_x) + k_p \right)} e + \Phi_S \right) / \Phi_S \right) + \Delta U_{3M}}{U_0} \quad (8)$$

Похибка квантування цього засобу оцінюється наступним чином:

$$\delta_k = \frac{1}{N} \cdot 100\% = \frac{U_0}{k_U 2^n \left( S'_H \ln \left( \left( \Phi_0 e^{-\left( \alpha_v C_x + \alpha_{\text{II}} (C_\Sigma - C_x) + k_p \right) e} + \Phi_S \right) / \Phi_S \right) + \Delta U_{\text{зм}} \right)} \cdot 100\% . \quad (9)$$

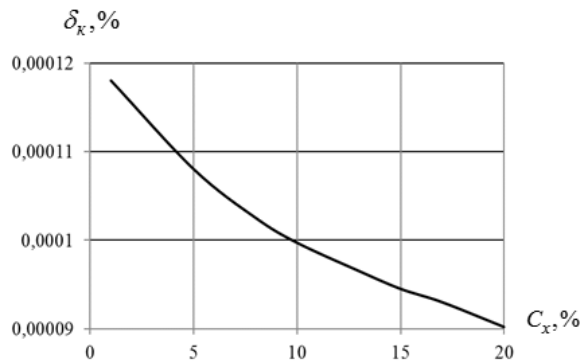


Рис. 4. Зміна похибки квантування в діапазоні контрольованої величини

Залежність зміни похибки квантування у діапазоні значень контрольованої величини наведена на рис. 4.

Провівши дослідження зміни похибки квантування при лінійній, квадратичній (у статті результати не наведено) та логарифмічній (рис. 4) ФП ВК у діапазоні зміни контрольованої величини  $C_x = 1..20\%$ , було встановлено, що вони усі мають нелінійний характер. Найбільша похибка квантування спостерігається при лінійній ФП ВК, найменша – при логарифмічній.

**Висновки.** Аналіз отриманого рівняння надлишкових вимірювань показав, що результат не залежить від абсолютного значення нормованого за значенням потужності потоку ОВ, показників поглинання води та листового матеріалу, показника розсіювання та абсолютного значення товщини матеріалу та їх відхилень у результаті дії дестабілізуючих факторів. Вплив зміщення логарифмічної функції перетворення вимірювального каналу (адитивна складова похибки) вилучається у результаті проведення додаткового такту вимірювань та операції віднімання. Вимірювання вологості досліджуваного матеріалу за допомогою представленого засобу вимірювального контролю також дозволяє вилучити й мультиплікативну складову похибки (проведення додаткових тактів вимірювання), забезпечити нечутливість методу до часової та температурної нестабільності параметрів функції перетворення вимірювального каналу за рахунок використання рівняння надлишкових вимірювань, що забезпечується за допомогою операції ділення. На результат впливає похибка встановлення  $k_{\Phi}$ .

Вимірювання вологості при логарифмічній функції перетворення вимірювального каналу дозволяє здійснювати вимірювальний контроль вологості листових матеріалів у широкому діапазоні значень, при використанні всього діапазону вхідних значень. Введення у засіб другого вимірювального каналу дозволяє зменшити час вимірювання при високій точності вимірювання. Використання мікроконтролера дозволило автоматизувати процес вимірювального контролю вологості листових матеріалів.

## Література

1. Мухитдинов М. Оптические методы и устройства контроля влажности / М. Мухитдинов, Э.С. Мусаев. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
2. Кондратов В.Т. Теория избыточных измерений / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 1. – С. 7–24.
3. Богачук В.В. Методи та засоби вимірювального контролю вологості порошкоподібних матеріалів : монографія / В.В. Богачук, Б.І. Мокін. – Вінниця : Універсум, 2008.
4. Володарський Є.Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник / Є.Т. Володарський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко, Г.Б. Сердюк. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 219 с.
5. Разумный В.М. Оценка параметров автоматического контроля / В.М. Разумный. – М. : Энергия, 1975. – 80 с.

Рецензія/Peer review : 16.3.2017 р.

Надрукована/Printed : 19.4.2017 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Любчик В.Р.