

# ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.317

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТА АНАЛІЗУ КОЕФІЦІЄНТІВ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

© Роман Івах, Михайло Дорожовець, 2009

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірвальних технологій,  
вул. С.Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Запропоновано методику визначення коефіцієнтів впливу температури на результат вимірювання вологості  
сипких матеріалів методом найменших квадратів; здійснено аналіз характеристик похибок знайдених  
коефіцієнтів.*

*Предложена методика определения коэффициентов влияния температуры на результат измерения  
влажности сыпучих материалов методом наименьших квадратов; осуществлен анализ характеристик  
погрешностей найденных коэффициентов.*

*The method of determination of coefficients of influence of temperature is offered on the result of measuring of  
humidity of friable materials by a least-squares method; the analysis of descriptions of errors of the found coefficients is  
carried out.*

**1. Вступ.** Вимірювання вологості сипких матеріалів (СМ) та проектування вологомірів є актуальним завданням для України, оскільки одним із стратегічних напрямів економіки є виробництво зерна та продуктів його переробки. Точний контроль вмісту вологи у зерні сприяє зниженню витрат, пов'язаних із сушінням та зберіганням. Можливість точного визначення вологості зерна у потрібний момент, а особливо під час збирання врожаю, є тим фактором, що відокремлює прибуток від збитків.

Прямі методи вимірювання вологості зернових культур придатніші для використання в приладах лабораторного застосування, оскільки вони вимагають значних затрат часу та спеціального лабораторного устаткування.

Серед непрямих методів вимірювання вологості СМ одним із найперспективніших є ємнісний (дієлькометричний) метод вимірювання, оскільки його реалізація дає можливість отримати високу швидкодію та точність вимірального перетворення вихідного сигналу перетворювача, автоматизувати вимірювання та обробку інформації [1].

Як відомо [2, 3], під час вимірювання вологості СМ на діелектричні властивості СМ впливає багато

факторів, таких, як температура, гранулометричний склад (форма, розміри тощо), структура зерен, хімічний склад тощо. Серед перелічених неінформативних параметрів найістотношою є температура СМ. Загалом зміна температури вносить додаткову похибку у результат вимірювання ємності ємнісного первинного перетворювача (ЄПП) дієлькометричним методом. Для певної температури ця похибка є систематичною і її можна скоригувати. Для коригування цієї похибки необхідно знати коефіцієнти впливу температури.

**Метою роботи** є визначення та аналіз коефіцієнтів впливу температури на результат вимірювання вологості сипких матеріалів для подальшого коригування цієї складової похибки.

**2. Експериментальне дослідження впливу температури та вологості сипкого матеріалу на результат вимірювання ємності первинного перетворювача.** Попередньо нами були приготовані декілька проб зерна пшениці, взятої з одного поля, тобто це СМ одного типу. Ці проби були зволожені різною кількістю води. Вологість проб визначали термогравіметричним методом (методом сушіння та зважування) згідно з [4]. У результаті ми отримали проби зерна пшениці з такими значеннями вологості: 10,87 %; 14,63 %; 19,30 %; 23,42 %.

Після цього проби різної вологості по чергово засипали у ЄПП і поміщали у термокамеру TV 1000, де попередньо встановлювали температуру від +10 °С до +40 °С з кроком 5 °С з допустимою точністю ±1 °С. Вихідну ємність ЄПП вимірювали попередньо відкаліброваним цифровим вимірювачем LCR E7-12.

Отримані результати експерименту подано графічно (рис. 1).

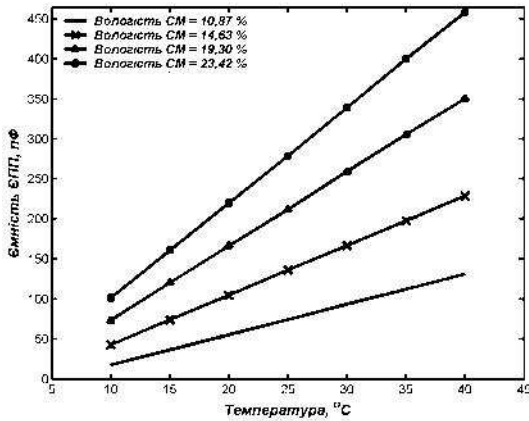


Рис. 1. Вплив температури СМ на ємність первинного перетворювача при різних значеннях вологості СМ

**3. Визначення параметрів математичної моделі ЄПП методом найменших квадратів.** Отож, як ми бачимо, ці залежності мають виражений лінійний характер із різним нахилом та зміщенням. Для встановлення параметрів залежності ємності від вологості та температури  $C = f(W, \theta)$  і подальшого аналізу скористаємося методом найменших квадратів (МНК), який дає змогу знайти білінійну математичну модель відносно двох факторів: вологості і температури у вигляді [5, 6]:

$$C_{ij} = b_0 + b_1 W_i + b_2 \theta_j + b_3 W_i \theta_j, \quad (1)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – шукані коефіцієнти математичної моделі;  $W$  – відома вологість СМ;  $\theta$  – встановлена у термокамері температура СМ.

Основою для визначення коефіцієнтів залежності (1) є результати експерименту: 28 різних значень ємності для комбінації з 4 значень вологості ( $i = 4$ ) та 7 значень температури ( $j = 7$ ) (див. таблицю).

Оскільки під час вимірювань ємності наявні похибки вимірювання, то залежність (1) можна записати у такому вигляді:

$$b_0 + b_1 W_i + b_2 \theta_j + b_3 W_i \theta_j = y_{ij} + \Delta_{ij}, \quad (2)$$

де  $i = 1...4, j = 1...7, \Delta_{ij}$  – відхилення математичної моделі (залежності (1)) від експериментальних результатів.

Критерієм МНК є мінімізація суми квадратів відхилень [7]:

$$\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^7 \Delta_{ij}^2 = \min$$

$$\text{або } \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^7 (b_0 + b_1 W_i + b_2 \theta_j + b_3 W_i \theta_j - y_{ij})^2 = \min. \quad (3)$$

Якщо позначити матрицю первинної системи рівнянь (2) як

$$A = \begin{pmatrix} 1 & W_1 & \theta_1 & W_1 \theta_1 \\ 1 & W_1 & \theta_2 & W_1 \theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W_2 & \theta_1 & W_2 \theta_1 \\ 1 & W_2 & \theta_2 & W_2 \theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W_3 & \theta_1 & W_3 \theta_1 \\ 1 & W_3 & \theta_2 & W_3 \theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W_4 & \theta_1 & W_4 \theta_1 \\ 1 & W_4 & \theta_2 & W_4 \theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W_4 & \theta_7 & W_4 \theta_7 \end{pmatrix} \quad (4)$$

і відповідно вектор результатів вимірювання як:

$$Y^T = (y_1; y_2; y_3; y_4; \dots; y_{28}), \quad (5)$$

тоді згідно з методикою МНК нормальна система рівнянь матиме вигляд [7]:

$$(A^T A) \cdot B = A^T Y, \quad (6)$$

де  $B$  – вектор шуканих коефіцієнтів:

$$B^T = (b_0; b_1; b_2; b_3). \quad (7)$$

Розв'язком (6) є

$$B = (A^T A)^{-1} \cdot A^T Y. \quad (8)$$

З погляду подальшого аналізу простіші результати отримаємо, коли обидва вхідні фактори ( $W, \theta$ ) змістимо на їх середнє значення, тобто

$$\begin{cases} W'_i = W_i - \bar{W}; \\ \theta'_j = \theta_j - \bar{\theta}, \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{де } \bar{W} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 W_i; \quad \bar{\theta} = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 \theta_j. \quad (10)$$

У цьому випадку матриця  $A$  системи (2) змодифікується до  $A'$ , в результаті чого матриця

$$M' = (A'^T \cdot A') \quad (11)$$

і для системи лінійних рівнянь стає діагональною [7]:

$$M' = 28 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{W}'^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\theta}'^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{W}'^2 \bar{\theta}'^2 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\text{де } \bar{W}'^2 = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (W_i - \bar{W})^2; \quad \bar{\theta}'^2 = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 (\theta_j - \bar{\theta})^2.$$

**Експериментальнi значення ємностi ( $n\Phi$ ) за рiзних значень температури та вологостi СМ**

Температура, °С \ Вологiсть	10,87 %	14,63 %	19,30 %	23,42 %
10 °С	17,52	42,65	73,42	100,94
15 °С	36,39	73,87	120,08	161,01
20 °С	55,38	104,54	166,29	219,56
25 °С	74,19	136,21	211,67	278,83
30 °С	93,50	166,53	259,17	339,01
35 °С	112,03	197,83	305,48	400,02
40 °С	131,28	228,79	350,25	458,36

Тодi завдяки простiй структурi матрицi (12) значення елементiв вектора

$$C = A^T \cdot Y \tag{13}$$

можна розрахувати аналітично:

$$C_0 = 28 \cdot \bar{y};$$

$$C_1 = 7 \left[ \begin{aligned} &W_1 \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_6 + y_7}{7} + W_2 \frac{y_8 + y_9 + \dots + y_{13} + y_{14}}{7} + \\ &+ W_3 \frac{y_{15} + y_{16} + \dots + y_{20} + y_{21}}{7} + W_4 \frac{y_{22} + y_{23} + \dots + y_{26} + y_{28}}{7} \end{aligned} \right];$$

$$C_2 = 4 \left[ \begin{aligned} &\theta_1 \frac{y_1 + y_8 + y_{15} + y_{22}}{4} + \theta_2 \frac{y_2 + y_9 + y_{16} + y_{23}}{4} + \\ &+ \theta_3 \frac{y_3 + y_{10} + y_{17} + y_{24}}{4} + \dots + \theta_7 \frac{y_7 + y_{14} + \dots + y_{21} + y_{28}}{4} \end{aligned} \right];$$

$$C_3 = 7 \left[ \begin{aligned} &W_1 \frac{(\theta_1 y_1 + \theta_2 y_2 + \dots + \theta_6 y_6 + \theta_7 y_7)}{7} + W_2 \frac{(\theta_1 y_8 + \theta_2 y_9 + \dots + \theta_6 y_{13} + \theta_7 y_{14})}{7} + \\ &+ W_3 \frac{(\theta_1 y_{15} + \theta_2 y_{16} + \dots + \theta_6 y_{20} + \theta_7 y_{21})}{7} + W_4 \frac{(\theta_1 y_{22} + \theta_2 y_{23} + \dots + \theta_6 y_{27} + \theta_7 y_{28})}{7} \end{aligned} \right].$$

Отже, значення шуканих коефіцієнтів математичної моделі (1) зі зміщенням на середнє значення становлять:

$$b'_0 = C_0; \quad b'_1 = C_1 / \bar{W}^{\prime 2};$$

$$b'_2 = C_2 / \bar{\theta}^{\prime 2}; \quad b'_3 = C_3 / (\bar{W}^{\prime 2} \cdot \bar{\theta}^{\prime 2}).$$

Використовуючи для розрахунку програмний пакет MathCAD\_2001, одержимо такі значення коефіцієнтів:

$$b'_0 = 175,529; \quad b'_1 = 16,366;$$

$$b'_2 = 7,791; \quad b'_3 = 0,649.$$

**4. Аналіз характеристик похибок знайдених коефіцієнтів.** Оцінку дисперсії коефіцієнтів залежності (2) можна знайти на підставі залишкових квадратів відхилень знайденої лінійної залежності від експериментальних точок:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{28} (y_i - y_{\text{мод}})^2}{28 - 4} = 0,227, \tag{14}$$

та діагональних коефіцієнтів так званої дисперсійної матриці системи рівнянь

$$MD = (M')^{-1}, \tag{15}$$

яка завдяки діагональності матиме вигляд:

$$MD = \frac{1}{28} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\bar{W}^{\prime 2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\bar{\theta}^{\prime 2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\bar{W}^{\prime 2} \cdot \bar{\theta}^{\prime 2}} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 0,03571 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,593 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,571 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,593 \cdot 10^{-5} \end{vmatrix} \tag{16}$$

Тобто оцінки дисперсії коефіцієнтів моделі розраховуємо так:

$$\begin{aligned}
 S_{b_0}^2 &= S_y^2 MD_{0,0} = 8,124 \cdot 10^{-3}; \\
 S_{b_1}^2 &= S_y^2 MD_{1,1} = \frac{S_y^2}{\bar{W}'^2} = 3,623 \cdot 10^{-4}; \\
 S_{b_2}^2 &= S_y^2 MD_{2,2} = \frac{S_y^2}{\bar{\theta}'^2} = 8,124 \cdot 10^{-5}; \\
 S_{b_3}^2 &= S_y^2 MD_{3,3} = \frac{S_y^2}{\bar{W}'^2 \bar{\theta}'^2} = 3,623 \cdot 10^{-6}.
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Завдяки діагональності матриці (16) значення відповідних коефіцієнтів взаємно не корельовані, тому оцінка дисперсії знайденої моделі (2) для будь-якого значення вологості ( $W_i$ ) та температури ( $\theta_j$ ) (у досліджуваному діапазоні температури та вологості) описується залежністю [7]:

$$\begin{aligned}
 S_{y \text{ мод}}^2(W_i', \theta_j') &= S_{b_0}^2 + S_{b_1}^2 W_i'^2 + S_{b_2}^2 \theta_j'^2 + S_{b_3}^2 W_i'^2 \theta_j'^2 = \\
 &= S_y^2 \left[ 1 + \frac{W_i'^2}{\bar{W}'^2} + \frac{\theta_j'^2}{\bar{\theta}'^2} + \frac{W_i'^2 \cdot \theta_j'^2}{\bar{W}'^2 \cdot \bar{\theta}'^2} \right],
 \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned}
 S_{y \text{ мод}}^2(W_i, \theta_j) &= S_y^2 \left[ 1 + \frac{(W_i - \bar{W})^2}{\bar{W}'^2} + \right. \\
 &\left. + \frac{(\theta_j - \bar{\theta})^2}{\bar{\theta}'^2} + \frac{(W_i - \bar{W})^2 \cdot (\theta_j - \bar{\theta})^2}{\bar{W}'^2 \cdot \bar{\theta}'^2} \right].
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

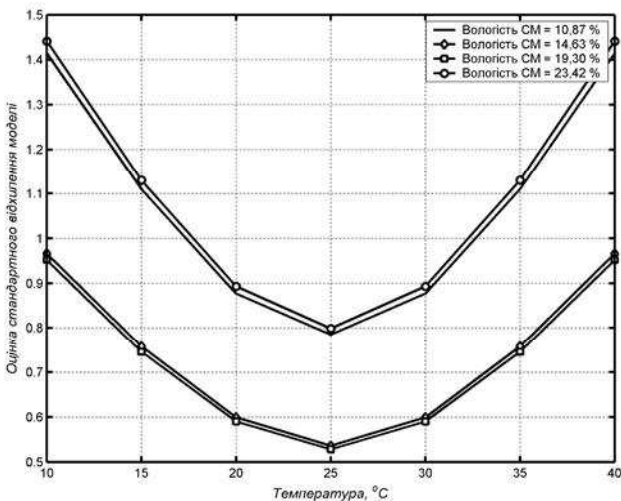


Рис. 2. Оцінка стандартного відхилення апроксимуючої моделі

Оцінки стандартного відхилення знайдених коефіцієнтів та апроксимуючої моделі є квадратними коренями оцінок дисперсії:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{b_0} &= \sqrt{S_{b_0}^2} = 0,09013; \\
 \sigma_{b_1} &= \sqrt{S_{b_1}^2} = 0,01903; \\
 \sigma_{b_2} &= \sqrt{S_{b_2}^2} = 9,013 \cdot 10^{-3}; \\
 \sigma_{b_3} &= \sqrt{S_{b_3}^2} = 1,903 \cdot 10^{-3}.
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{y \text{ мод}}(W_i, \theta_j) &= \sqrt{S_{y \text{ мод}}^2(W_i, \theta_j)} = \\
 &= S_y \sqrt{1 + \frac{(W_i - \bar{W})^2}{\bar{W}'^2} + \frac{(\theta_j - \bar{\theta})^2}{\bar{\theta}'^2} + \frac{(W_i - \bar{W})^2 \cdot (\theta_j - \bar{\theta})^2}{\bar{W}'^2 \cdot \bar{\theta}'^2}}.
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

**5. Оцінювання істотності значень розрахованих коефіцієнтів апроксимуючої моделі.** Щоб переконатися, що знайдені коефіцієнти адекватно описують математичну модель, перевіримо їхню істотність. Оцінюватимемо за допомогою тесту t-Стюдента [7], який ґрунтується на тому, що одержані коефіцієнти  $b_i$  є нормально розподіленими, і їхнє математичне сподівання збігається зі значеннями коефіцієнтів  $M(b_i) = b_i$ , а оцінки їхніх стандартних відхилень одержують з коваріаційної матриці  $\sigma_{b_i} = S_y \cdot \sqrt{M_{i,i}}$ .

Тому для перевірки на істотність значення коефіцієнтів  $b_i$  згідно з тестом t-Стюдента знаходять параметр відношення:

$$g_t = \frac{|b_i|}{\sigma_{b_i}} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S_{b_i}^2}},
 \tag{21}$$

яке має розподіл Стюдента з  $\nu = n - m$  ступенями свободи.

З таблиць квантилів Стюдента для заданого рівня істотності  $\alpha$  знаходять критичне значення  $t_{1-\alpha/2}(n - m)$ . Якщо виконується умова:

$$g_t \geq t_{1-\alpha/2}(n - m),
 \tag{22}$$

то коефіцієнт визнають істотним. В іншому разі коефіцієнт вважають неістотним і надають йому нульового значення і розрахунок повторюють спочатку.

Отож, у нашому випадку  $n = 28$ ,  $m = 4$ , з таблиць Стюдента [7, с. 166] для  $P_{\text{дов}} = 0,95$  і  $\nu = n - m = 24$  критичне значення  $t_{0,95}(24) = 2,064$ .

$$\begin{aligned}
 \text{Відповідно} \quad g_{b_0} &= 367,985; & g_{b_1} &= 162,0396; \\
 g_{b_2} &= 162,3125; & g_{b_3} &= 64,9.
 \end{aligned}$$

Як бачимо, умова (22) виконується, тобто знайдені значення коефіцієнтів апроксимуючої моделі є істотними.

**6. Оцінювання ефективності коригування систематичної температурної похибки.** Спочатку визначимо характеристики систематичної похибки вимірювання шуканого параметра (вологості) від впливу змін температури (без корекції).

З функції

$$C_x = b_0 + b_1(W_x - \bar{W}) + b_2(\theta - \bar{\theta}) + b_3(W_x - \bar{W}) \cdot (\theta - \bar{\theta}) \quad (23)$$

шукана вологість

$$W_x = \bar{W} + \frac{C_x - b_0 - b_2(\theta - \bar{\theta})}{b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta})}; \quad (24)$$

Звідси залежність систематичної похибки від впливу температури ( $\theta$ ):

$$\Delta W(\theta) = W_x(\theta) - W_x(\bar{\theta}) = \frac{-(\theta - \bar{\theta})[b_1 b_2 + b_3(C_x - b_0)]}{b_1 [b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta})]}. \quad (25)$$

Залежності (25) для різних значень вологості наведено на рис. 3.

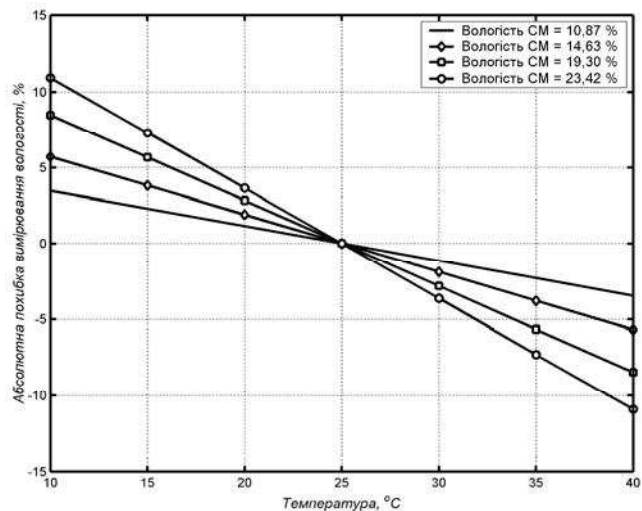


Рис. 3. Абсолютна систематична похибка вимірювання вологості СВ, зумовлена впливом температури (без коригування)

Як бачимо, при відхиленні температури від середнього значення 25 °C похибка лінійно змінюється і може досягати від  $\pm 4\%$  для вологості СВ 10,87% до  $\pm 11\%$  для вологості СВ 19,30%.

Завдяки контролю температури та відомим коефіцієнтам  $b_i$  значення вологості є скоригованим відповідно до (24). Однак коефіцієнти апроксимаційної залежності та температура відомі з певними похибками, характеристики яких обчислені вище. Тому оцінимо нескоригований залишок похибки від впливу температури. Знайдемо вираз нескоригованого залишку:

$$\Delta W_x = \frac{\partial W_x}{\partial b_0} \Delta b_0 + \frac{\partial W_x}{\partial b_2} \Delta b_2 + \frac{\partial W_x}{\partial b_1} \Delta b_1 + \frac{\partial W_x}{\partial b_3} \Delta b_3 + \frac{\partial W_x}{\partial \theta} \Delta \theta. \quad (26)$$

Відповідно

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial W_x}{\partial C_x} &= \frac{1}{b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta})}; & \frac{\partial W_x}{\partial b_0} &= -\frac{1}{b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta})}; \\ \frac{\partial W_x}{\partial b_1} &= -\frac{C_x - b_0 - b_2(\theta - \bar{\theta})}{(b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta}))^2}; \\ \frac{\partial W_x}{\partial b_3} &= -\frac{(C_x - b_0 - b_2(\theta - \bar{\theta})) \cdot (\theta - \bar{\theta})}{(b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta}))^2}; \\ \frac{\partial W_x}{\partial \theta} &= \frac{-b_1 b_2 - (C_x - b_0) b_3}{(b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta}))^2}. \end{aligned} \right. \quad (27)$$

Приймаючи, що складові виразу (26) некорельовані між собою, оцінка дисперсії нескоригованого залишку температурної похибки описується залежністю:

$$S_{W_x}^2(\theta) = \frac{S_{b_0}^2 + (\theta - \bar{\theta})^2 \cdot S_{b_2}^2 + C_x^2 \cdot S_{b_1}^2 + C_x^2 \cdot (\theta - \bar{\theta})^2 \cdot S_{b_3}^2}{(b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta}))^2} + \frac{(b_1 b_2 + (C_x - b_0) b_3)^2 \cdot S_{\theta}^2}{(b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta}))^2}. \quad (28)$$

Оцінка стандартного відхилення нескоригованого залишку температурної похибки:

$$S_{W_x}(\theta) = \sqrt{S_{W_x}^2(\theta)} = \frac{1}{|b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta})|}.$$

$$\left[ \sqrt{S_y^2 \left[ \frac{M_{0,0} + (\theta - \bar{\theta})^2 \cdot M_{2,2} + C_x^2 \cdot M_{1,1} + C_x^2 \cdot (\theta - \bar{\theta})^2 \cdot M_{3,3}}{(b_1 + b_3 \cdot (\theta - \bar{\theta}))^2} \cdot \frac{\Delta \theta_{гр}^2}{3} \right]} \right] \quad (29)$$

Довірчі границі нескоригованого залишку температурної похибки при  $P_{дов} = 0,95$  визначаються з виразу:

$$\Delta_{дов}(W(\theta)) = 1,96 \cdot S_{W_x}(\theta) \quad (30)$$

Ефективність коригування систематичної температурної складової похибки знайдемо як відношення максимального значення температурної похибки без коригування  $|\Delta W(\theta)|_{max}$  до довірчого значення нескоригованого залишку температурної похибки  $|\Delta_{дов}(W(\theta))|$ , тобто

$$E_{W_i, \theta_j} = \frac{|\Delta W(\theta)|_{max}}{|\Delta_{дов}(W(\theta))|}. \quad (31)$$

Ефективність коригування температурної складової похибки відповідно до (31) зображено на рис. 5.

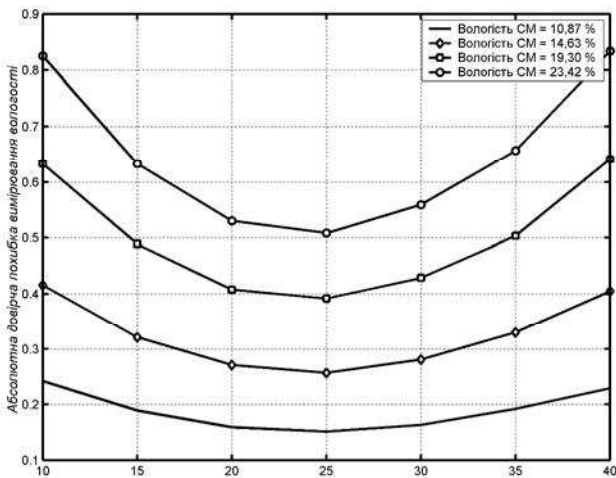


Рис. 4. Абсолютна довірча похибка вимірювання вологості СМ, зумовлена впливом температури (із урахуванням коригування)

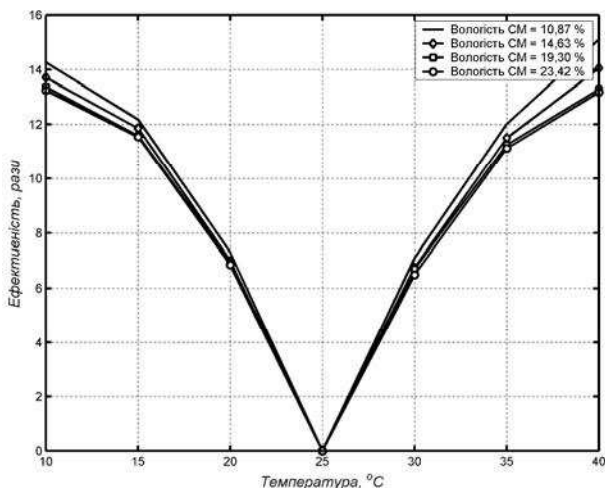


Рис. 5. Ефективність коригування температурної складової похибки під час вимірювання вологості СМ

Аналізуючи рис. 5, можна зазначити, що контроль температури під час вимірювання вологості сипкого матеріалу підвищує точність вимірювання від 7 разів до 14 залежно від температури, за якої ведуться вимірювання.

Отже, значний вплив температури зумовлює необхідність її вимірювання одночасно з вимірюванням

ємності ЄПП під час вимірювання діелектричних властивостей СМ дількометричним експрес-аналізатором. Для цього можна використовувати низку способів, які аналогічні тим, що застосовуються під час електричних вимірювань інших фізичних величин.

## Висновки

1. Під час вимірювання діелектричної проникності СМ на результат вимірювання, окрім інструментальних похибок, впливають інші чинники, зокрема температура СМ.

2. Застосовуючи метод найменших квадратів, визначено коефіцієнти білінійної математичної моделі залежності ємності ПП від вологості та температури СМ з оцінкою стандартного відхилення не більше за 0,02.

3. Температура середовища може бути контролюваною із достатньою для практичних цілей точністю  $\pm 1,0$  °C, тому коригуванням систематичну температурну складову похибки можна зменшити у 7 – 14 разів.

1. Івах Р., Дорожовець М., Питель І. Систематизація методів вимірювання вологості сипких матеріалів // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2003. – Вип. 62. С. 97–101. 2. Кричевский Е. С., Волченко А. Г., Галушкин С. С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов. – М.: Энергоатомиздат. 1987. 3. Берлинер М. А. Измерения влажности. – М.: Энергия. 1973. 4. ГОСТ 13586.5-93. Зерно. Метод определения влажности. 5. Пилипчук М. І. Основи наукових досліджень: підруч. / М.І. Пилипчук, А.С. Григор'єв, В.В. Шостак. – К.: Знання, 2007. – 271 с. 6. Білей П. В., Довга Н. Д., Ханік Я. М. та ін. Методологія наукових досліджень технологічних процесів: Навч. посіб. – Львів: Панорама, 2003. – 182 с. 7. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань: Навч. посіб. – Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2007. – 624 с. 8. Основи метрології та вимірювальної техніки: [підруч.: у 2 томах] / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчук / За ред. д.т.н., проф. Б. Стадника. – Т. 2. Вимірювальна техніка. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. – 656 с.