

## СТАБІЛІЗАЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА В ПОТОЦІ. КІБЕРНЕТИЧНИЙ ПІДХІД

Хобін В.А., д-р техн. наук, професор, Гапонюк І.О., магістр  
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

*Розглядається підхід для забезпечення метрологічно-обґрунтованих вимірювань вологості зерна у потоці автоматичними вологомірами. Його сутність – створення автоматизованої системи, де разом з автоматичними використовуються лабораторні вимірювання. Це дозволяє стабілізувати точність автоматичних безперервних вимірювань на рівні точності лабораторних.*

*The approach for providing of the metrology-well-grounded humidity measurements grain in a stream by automatic hydrometers is considered. Its essence - creation of the automated system where laboratory measurements are used alongside with automatics. It allows to stabilize accuracy of automatic continuous measurements at a level of accuracy of laboratory measurements.*

Ключові слова: зерно, вологість, вимірювання, автоматичні вологоміри, метрологія, точність, стабілізація.

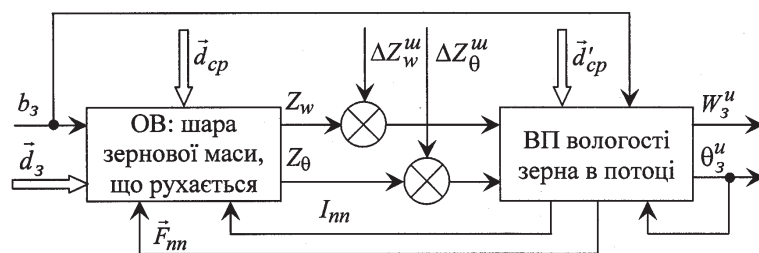
**Вступ.** Гарантування необхідної точності безперервних вимірів вологості рухомої зернової маси на вході і виході зерносушарок є основоположною вимогою створення високоефективних систем автоматичного управління (САУ) процесами сушки. У [1] було обґрунтовано актуальність підвищення точності таких вимірів, перераховано фізичні характеристики зерна, що залежать від вологості, на основі яких розроблялися вологоміри, приведено відібрану «історичною практикою» номенклатуру вологомірів вологості зерна в потоці, доступних на українському ринку, і їхні основні характеристики. Там же наголошується, що значення погрешностей виміру, які наводять розробники вологомірів, м'яко кажучи, слабо метрологічно обґрунтовані. Але одночасно там підкреслюється, що повна метрологічна атестація, зокрема періодична перевірка цих вологомірів неможлива, оскільки метрологічно обґрунтованих і таких, що мають необхідний юридичний статус методик, немає. Їхнє створення неможливе через невизначено велику кількість чинників, які вносять погрешності до результатів вимірів. До числа цих чинників входять, перш за все, характеристики самого зерна, особливості його руху через чутливий елемент (або в його околиці залежно від конструкції), зміни характеристик вимірювального ланцюга з часом. «Коло замкнулося». Враховуючи ще і ту обставину, що потенціал підвищення точності вимірів за рахунок вдосконалення вживаних фізичних методів і пошуку нових, практично вичерпаний, то ситуація з перспективами досить точних вимірів вологості зерна в потоці виглядає тупиковою.

Пропонований вихід з неї – перехід у вимірах від автоматичних приладів до автоматизованих систем, що реалізують алгоритми виміру із зворотним зв'язком. Глибинну суть такого переходу можна сформулювати так: вирішення метрологічних проблем виміру вологості зерна в потоці необхідно вести на основі кібернетичних методів.

**Структурна схема прямого виміру вологості зерна в потоці як системи автоматичного виміру.** Вживання методів кібернетики вимагає вживання і відповідної термінології [2]. Це важливо, оскільки в методологічному контексті термінологія, що сформувалася в різних науках, априорі орієнтує дослідника на вживання певних шляхів, методів і методик вирішення завдань. Зазвичай вихідним пунктом досліджень в кібернетичі є представлення об'єкта дослідження як системи, і потім розвитку цієї системи. Графічним відображенням системи є її структурна схема.

Структурну схему виміру вологості зерна в потоці електрофізичними методами, які використовуються в промисловості, наведено на рис. 1. Основні елементи структури, що взаємодіють між собою, об'єкт виміру (ОВ) – шар рухомої зернової маси і вимірювальний пристрій (ВП) – що реалізує, наприклад, діелькометричний (ємнісний) метод виміру вологості. Відзначимо, що ВП поки що розглядається як елемент системи виміру, хоча його також можна розглядати і як систему (підсистему).

*Об'єкт виміру.* Вихідними змінними ОВ є ті, які для вибраного типу ВП використовуються як інформативні. Для ємнісного первинного перетворювача (ПП) вологості зерна в електричний сигнал вихідної змінної є  $Z_w$ , що характеризує діелектричні властивості зерна в змінному електромагнітному полі ПП з параметрами  $\vec{F}_w$ . Для резистивного ПП температури зерна в електричний сигнал вихідної змінної є  $Z_\theta$ , що характеризує величину активного опору ПП, що сприяє струму  $I_m$ , що протікає. Відзначимо, що пер-



**Рис. 1 – Структурна схема виміру вологості зерна в потоці електрофізичними методами, які використовуються в промисловості**

винні перетворювачі, в рамках кібернетичної структури, можуть розглядатися як складова частина ОВ, а в рамках технічної структури – частиною ВП.

Вхідними змінними ОВ є ті, які впливають на  $Z_w$  і  $Z_\theta$ :

а)  $\vec{d}_\zeta = (W_3, \theta_3, \rho_3, v_3, \dots)^T$  – вектор невизначеної розмірності, що відображає характеристики зернової маси:  $W_3$  – вологість зерна;  $\theta_3$  – температура зерна;  $\rho_3$  – об’ємна маса (натура) зерна;  $v_3$  – швидкість руху зерна та інші, наприклад, вміст білка, солей і заліза, розподіл води по біохімічних структурах зерна і ін.;

б)  $b_3$  – вид зернової культури; відзначимо, що цю змінну винесено з  $\vec{d}_\zeta$  у окрему змінну, оскільки її значення не вимагає виміру і завжди вважається відомим;

в)  $\vec{d}_{\bar{n}\delta} = (W_{cp}, \theta_{cp}, F_{cp}, \mu_k, \dots)^T$  – вектор невизначеної розмірності, що відображає характеристики середовища, в якому знаходиться ОВ:  $W_{cp}$  – вологість повітря в міжзерновому просторі;  $\theta_{cp}$  – температура повітря в міжзерновому просторі;  $F_{cp}$  – інтенсивність електромагнітних полів середовища;  $\mu_k$  – магнітна проникність металоконструкцій сушарки в околиці яких ведеться вимір вологості і ін.;

г)  $\vec{F}_{\bar{H}} = (A_{emk}, \omega_{emk})^T$  – вектор, що відображає характеристики електромагнітних коливань, які генерує датчик у вимірювальний простір (у простому випадку для гармонійних одночастотних коливань має розмірність 2):  $A_{emk}$  – амплітуда коливань;  $\omega_{emk}$  – частота коливань;

д)  $I_{nm}$  можна розглядати як скалярну величину (навіть в тому випадку, якщо цей вимірювальний струм є змінним), що характеризує його діюче значення.

Вхідні і вихідні змінні ОВ пов’язані між собою як причини і наслідки. У формалізованому виді ці зв’язки можна відобразити такими виразами:

$$Z_w = \Phi_w(b_3, d_3, W_3, \theta_3, \dots, \vec{d}_{\bar{n}\delta}, F_{nm}, t), \quad (1)$$

$$Z_\theta = \Phi_\theta(\theta_3, \vec{d}_{\bar{n}\delta}, t), \quad (2)$$

де  $\Phi_w, \Phi_\theta$  – апіорі невідомі з високим апостеріорним рівнем невизначеностей функції, що відображають зміни відповідних інформативних змінних від вказаних аргументів;

$t$  – час.

Введення у вирази (1) і (2) змінної  $t$ , що раніше не розглядалася, підкреслює, що по суті всі змінні, у тому числі і  $Z_w$  і  $Z_\theta$ , необхідно розглядати як функції часу. При цьому, в загальному випадку, ці функції часу матимуть детерміновані і випадкові складові різних спектрів частот, природу яких достовірно встановити неможливо. Характер залежності (1) відображають рис. 2 – 4. Їх компоненти взято з публікацій розробників автоматичних приладів і тих, хто професійно займається їх калібруванням [3 – 6]. Відзначимо, що до  $\Phi_w(\dots)$  відносяться саме крапки, проставлені в полі графіків лінії, довкола яких ці крапки групуються. Це вже графічна форма представлення моделей  $\Phi_w^i(W_\zeta, \theta_\zeta)$ , які з певною мірою точності описують взаємозв’язок інформативних змінних з вологістю зерна і його температурою. До уважнішого розгляду цих моделей повернемося нижче.

*Вимірювальний пристрій.* Вихідними змінними ВП, що визначають його функціональне призначення, є обмірювані значення  $W_\zeta^a, \theta_\zeta^a$  вимірюваних змінних  $W_3$  і  $Z_\theta$ . Змінні  $I_{nm}$  і  $\vec{F}_{\bar{H}}$  теж є вихідними для ВП, але значення цих змінних залишаються або фіксованими, або змінюються за задалегідь заданим алгоритмом, тобто не залежать від вхідних змінних ВП. Ці значення (або закони зміни) визначаються на етапі розробки ВП, виходячи з критеріїв ефективності його роботи, і в рамках рішення даного завдання змінюватися не можуть. Тому в наших подальших дослідженнях приділяти увагу змінним  $I_{nm}$  і  $\vec{F}_{\bar{H}}$  не будемо.

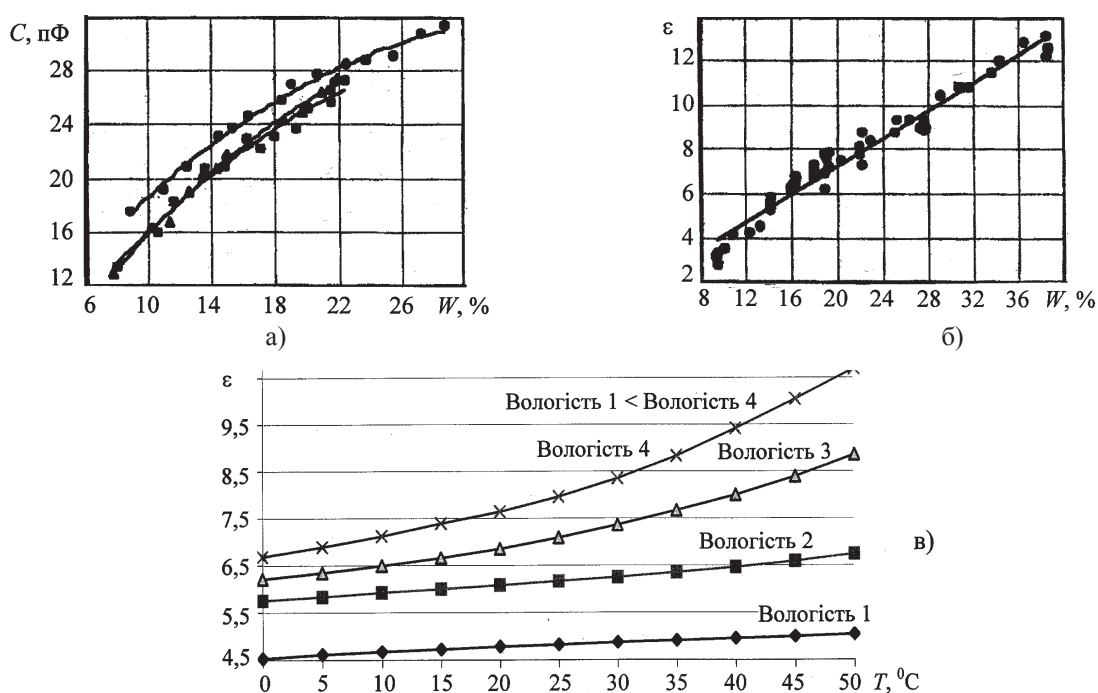


Рис. 2 – Приклад зміни електричної ємності  $C$  та відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  – інформативних змінних автоматичних дількометричних (ВЧ) вологомірів, для різних варіантів виміру:

- а) для трьох різних років вирощування пшениці одного і того ж сорту, див. [3, рис. 2.19];
- б) для дванадцяти різних сортів пшениці, вирощених в різних регіонах, див. [3, рис. 2.20];
- в) для іржі в широкому діапазоні температур, див. [4, рис. 1]

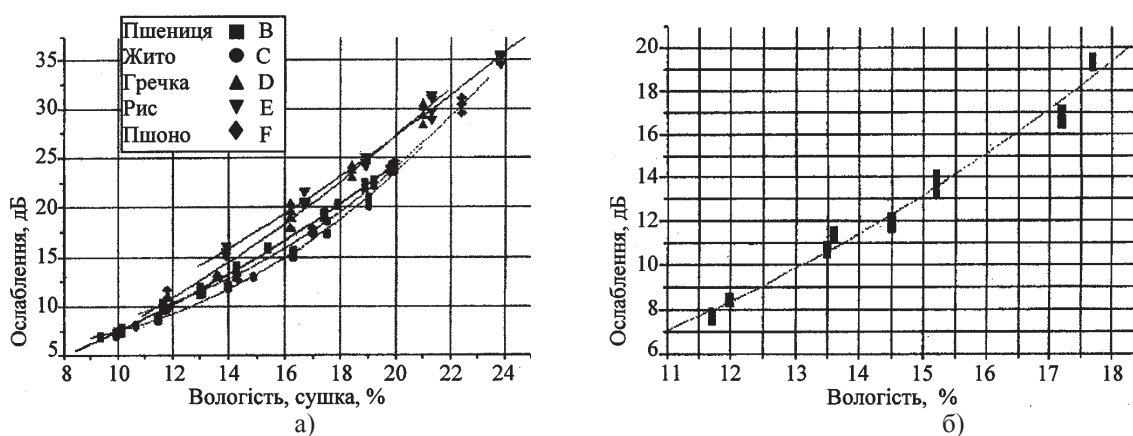


Рис. 3 – Приклади зміни ступеня ослаблення електромагнітного поля – інформативною змінною автоматичних СВЧ- вологомірів:

- а) для зерна різних культур, вологомір МІКРОРАДАР-101, див. [5, рис. 3];
- б) для зерна пшениці, вологомір зерна в потоці МІКРОРАДАР-113, див. [5, рис. 5]

Вхідними змінними ВП є  $Z_w$ ,  $Z_0$  з адитивними шумами виміру  $\Delta Z_w^o$  і  $\Delta Z_0^o$  і вектор  $\vec{d}'_{cp}$ , що відображає характеристики середовища, в якому знаходиться ВП. Очевидно, що  $\vec{d}'_{cp}$  за складом своїх компонентів можна вважати співпадаючим з  $\vec{d}'_{cp}$ , але значення цих компонентів, в загальному випадку, різні. Шуми виміру  $\Delta Z_w^o$  і  $\Delta Z_0^o$  відображають сукупний вплив на точність виміру відповідних змінних тих чинників, які раніше не враховувалися. Це можуть бути, наприклад, зміна імпедансу високочастотної лінії зв'язку датчика вологості з часом, зміни опору лінії зв'язку з первинним перетворювачем температури і так далі.

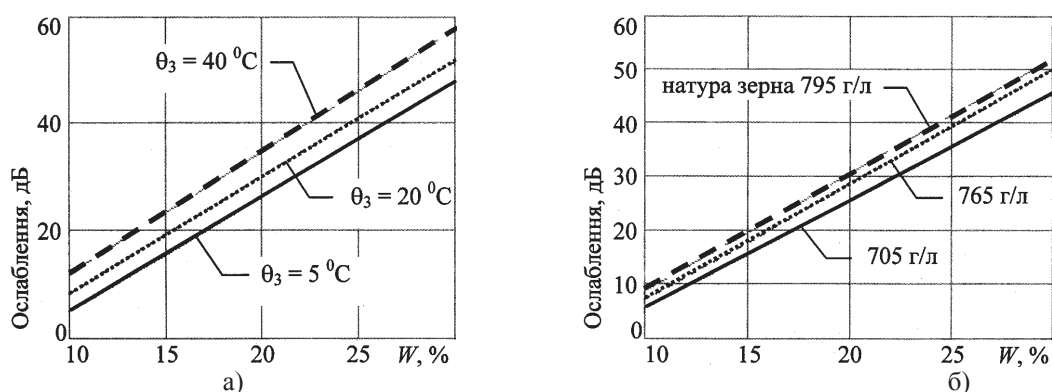


Рис. 4 – Залежність ослаблення потужності СВЧ від вологості зерна пшениці різної температури – а), натурі – б), див. [6, рис. 3, 4]

Причинно-наслідкові зв'язки між змінними у формалізованому вигляді можна представити виразами:

$$\begin{cases} W_{\zeta}^{\hat{a}} = \varphi_w(b_{\zeta}, Z_w, \theta_{\zeta}^{\hat{a}}, \Delta Z_w^{\hat{a}}, \vec{d}'_{cp}, t) \\ \theta_{\zeta}^{\hat{a}} = \varphi_{\theta}(Z_0, \Delta Z_{\theta}^{\hat{a}}, \vec{d}'_{cp}, t) \end{cases}, \quad (3)$$

де  $\varphi_w, \varphi_{\theta}$  – градувальні характеристики ВП.

**Метрологічні характеристики вимірювального пристрою.** Градувальні характеристики  $\varphi_w$  і  $\varphi_{\theta}$  мають бути зворотними функціями  $\Phi_w$  і  $\Phi_{\theta}$ . Останні в явному вигляді невідомі, тому їх приблизно отримують в лабораторних умовах. Останні дозволяють забезпечити:

- а) значення компонент  $\vec{d}'_{cp}$ , що відповідають паспортним умовам експлуатації ВП;
- б) складові шумів вимірів  $\Delta Z^{\hat{a}}$  близькими до нуля;
- в) досить високу точність значень  $W_{\zeta}^{\hat{a}}$  і  $\theta_{\zeta}^{\hat{a}}$ , що були виміряні, еталонних проб зерна і стабільність їх характеристик на всьому інтервалі часу, коли проводиться метрологічний експеримент.

Чинниками в цьому експерименті є  $W_{\zeta}, \theta_{\zeta}$  і  $b_{\zeta}$ , а функцією відгуку –  $Z_w$ . Експеримент завжди повинен проводитися як статистичний, оскільки і обмірювані значення аргументів і обмірювані значення функції принципово мають випадкові складові. Так, погрішність лабораторних вимірів вологості зерна, що виражена в абсолютних одиницях, складає за ГОСТом 13586.5-85, [7],  $\pm 0,5\%$ , а за ГОСТом 29143-91-93, [8], орієнтовно  $0,2 \dots 0,25\%$  (у цьому документі «прямим текстом» погрішність методу не вказано).

Поважно підкреслити наступне:

- а) чим ширше буде статистична вибірка по зерну, що відрізняється роком і місцем вирощання, терміном і умовами зберігання і так далі, тим більше буде дисперсія результатів виміру;
- б) вибірки відповідної генеральної сукупності, для випадку, що розглядається, не існує принципово.

Хорошу ілюстрацію результатів таких лабораторних експериментів дають рис. 2 і 3, які вже розглядалися вище. Крапками на графіках відзначено результати вимірів, а лінії (найчастіше це лінії регресії) є результатами їх статистичної обробки. Лінії регресії можна розглядати як одну з можливих форм представлення математичної моделі каналу ОВ, отриману за результатами використаної вибірки:

$$Z_w^i = \Phi_w^i(b_{\zeta}, W_{\zeta}, \theta_{\zeta}, \vec{a}_w^*), \quad (4)$$

де  $\vec{a}_w^*$  – вектор оптимальних значень параметрів моделі.

Формально, завдання визначення параметрів моделі (градувальної характеристики) ВП може бути сформульовано таким чином:

$$\vec{a}_w^* = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( Z_{w_{ij}}(W_{\zeta ij}^{\hat{a}}, \theta_{\zeta ij}^{\hat{a}}) - Z_w^i(W_{\zeta}, \theta_{\zeta}, \vec{a}_w^*) \right)^2, \quad (5)$$

де  $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$  – кількість експериментів, проведених з різними вологостями ( $i$ ) і температурами ( $j$ ) зерна при загальній кількості експериментів  $n \times m$ ;

$Z_{w_{ij}}$  – значення інформативного параметра ВП у експерименті за визначенням вологості лабораторним методом з номером експерименту  $ij$ ;

$W_{\zeta ij}^{\hat{a}}$  – значення вологості зерна, визначене лабораторним методом в експерименті з номером  $ij$ ;

$\theta_{cj}^a$  – обмірювані значення температур зерна в експериментах, до складу номера якого входить  $j$ ;

$\vec{a}_w$  – вектор параметрів моделі ВП, що підлягає визначенню.

Завдання (5) може вирішуватися аналітичними або алгоритмічними методами. Аналітичні методи, як правило, зводять до методу найменших квадратів, який передбачає завдання моделі  $Z_w^i$  у вигляді степеневого полінома. Алгоритмічні (чисельні) методи не вимагають вибору моделі спеціального вигляду. Це дозволяє обирати її з міркувань фізичної обґрунтованості, що, як правило, вимагає меншої кількості параметрів моделі для досягнення тієї ж точності опису експериментальних даних. А це, у свою чергу, забезпечує вищий рівень її адекватності об'єкту-оригіналу.

Адекватність об'єкту моделювання є найважливішою властивістю математичних моделей. Оцінка адекватності може вестися на основі різних критеріїв. Часто, у тому числі у вже цитованих публікаціях [3, 5], для оцінки якості моделі використовується найбільш простий показник – коефіцієнт кореляції  $r \in [0; 1]$ . На жаль, значення коефіцієнтів кореляції там наводяться без їх належного аналізу. При цьому головним свідомством хорошого результату моделювання є близькість значення  $r$  до 1, що «інтуїтивно відчувається».

Розглянемо два приклади. Перший приклад. У [3], див. рис. 2,б даної статті, лінію регресії представлено у вигляді (для «кімнатної» температури  $\theta_3$ ):  $Z_w^i \equiv \varepsilon = a_1^* W_\zeta + a_0^* = 0,312 W_\zeta + 1,03$  при  $r = 0,97$ . Другий приклад. У [5], аналізуючи результати випробування вологоміра МІКРОРАДАР-101 для зерна пшениці, автор відзначає наступне: «Статистичний аналіз отриманих результатів цих випробувань дає величину СКО = 0,164 і коефіцієнт кореляції  $r = 0,9989$ . Настільки високий коефіцієнт кореляції вказує на практично аналітичну залежність ослаблення мікрохвиль від вологості зерна...».

Дійсно, самі значення  $r$  в обох прикладах вельми близькі до 1. Але чи дає це підставу вважати, що це вказує на високі метрологічні властивості ВП? Для оцінки метрологічних властивостей ВП найчастіше застосовують показник, що називають класом точності –  $\gamma_w^{max}$ . Він чисельно дорівнює максимально допустимій відносній наведеній погрішності виміру, вираженій у відсотках. Для вологомірів її можна записати в наступному вигляді:

$$\gamma_w = \left( \Delta W_\zeta / \Delta W_\zeta^{\bar{a}\bar{a}} \right) 100 \% ; \quad \gamma_w^{max} = \left( \Delta W_\zeta^{max} / \Delta W_\zeta^{\bar{a}\bar{a}} \right) 100 \% , \quad (6)$$

де  $\gamma_w, \gamma_w^{max}$  – відносна наведена погрішність виміру і її максимальне значення;

$\Delta W_\zeta, \Delta W_\zeta^{max}$  – абсолютна погрішність виміру вологості і її максимально допустиме значення для ВП класу точності  $\gamma_w^{max}$  ;

$\Delta W_\zeta^{\bar{a}\bar{a}}$  – діапазон виміру вологості ВП.

У [9] підкреслюється, що значення  $r$  пов'язані з  $\gamma_w$  ВП дуже нелінійно. Так, для діапазону класів точності ВП  $\gamma_w^{max} \in (2,5 - 0,25) \%$ , який характерний для засобів виміру, відповідає діапазону зміни коефіцієнта кореляції  $r \in (0,999 - 0,99999)$ . При цьому для першого прикладу при  $r = 0,97$   $\gamma_w \approx 14 \%$ , а для другого прикладу при  $r = 0,9989$   $\gamma_w \approx 3 \%$ . Якщо вважати, що  $\gamma_w = \gamma_w^{max}$ , то для діапазону виміру вологості зерна  $W_\zeta \in (10 - 30) \%$ , тобто  $\Delta W_\zeta^{\bar{a}\bar{a}} = 20 \%$ , абсолютні погрішності можуть досягати наступних значень:  $\Delta W_\zeta^{max} = 2,8 \%$  – для першого прикладу;  $\Delta W_\zeta^{max} = 0,6 \%$  – для другого прикладу.

Ці результати можна інтерпретувати таким чином. Ємнісний (ВЧ) вологомір, який використовувався в першому випадку, застосовувати не можна без переградуювання його під конкретний вигляд зерна – погрішність виміру дуже висока. СВЧ- вологомір забезпечує досить високу точність вимірів вологості, але лише для того зерна, на якому його було відкалібровано. Тут необхідно зробити застереження. Останнє зауваження буде справедливим лише в тому випадку, якщо статистичний експеримент, на підставі якого було зроблено висновок про дуже високі для виміру вологості ступені кореляції ( $r = 0,9989$ ) даних експерименту і точності виміру ( $\Delta W_\zeta^{max} = 0,6 \%$ ) було проведено з урахуванням усіх вимог до статистичних експериментів. Зокрема, було враховано погрішність виміру вологості методом висушування. Прямих відомостей в [5] про це немає, як немає відомостей про ГОСТ, який використовувався для визначення цієї вологості лабораторним методом.

Сказане вище стосувалося автоматичних лабораторних вологомірів, для яких застосовують спеціально підготовлені проби зерна. Для вологомірів зерна в потоці виникають додаткові, причому нестаціонарні погрішності. Тому дати коректну метрологічну оцінку таким вологомірам безвідносно до фактичного стану всіх елементів вимірювального перетворювача і градуювання (калібрування) ВП на конкретний вид зерна неможливо. Метрологічні характеристики, які наводяться розробниками таких вологомірів

(див. зведений перелік в [1]), викликають сумніви в їх вірогідності.

**Структурна схема автоматизованої системи виміру вологості зерна в потоці.** Підкреслимо ще раз наступне. На сьогоднішній день, коли надії на можливості нових фізичних принципів виміру вологості зникли, необхідно визнати той факт, що автоматичні вологоміри зерна в потоці не можна розглядати повною мірою як засіб виміру. Це пов'язано з тим, що забезпечити єдність вимірів можна лише тоді, коли (далі цитується по [10, п. 13.1 «Єдність вимірів»]) «погрішності результатів відомі і із заданою імовірністю не виходять за встановлені межі». У разі виміру вологості зерна в потоці це неможливо. Причому неможливо принципово, оскільки і нові фізичні принципи вимірів не дозволили створити для них еталонів вологості, а без них метрологічну атестацію, зокрема – перевірку, засобу виміру не можна провести. Одночасно визначення вологості зерна лабораторним методом висушування повністю метрологічно забезпечено [7, 8].

Таким чином, розглянуто два альтернативних варіанти виміру вологості як варіанти інформаційної основи управління процесом сушки зерна. Вони мають наступні достоїнства і недоліки.

*Автоматичний вимір.* Достоїнства: 1) відсутність «ручних» операцій при вимірах дозволить реалізувати завдання стабілізації вологості зерна на виході зерносушарки у вигляді автоматичної системи регулювання; 2) інформація про вологість зерна є безперервною у часі змінною з практично нульовим запізненням у каналі виміру, а це дозволить в автоматичній системі регулювання досягти досить високої динамічної точності стабілізації цієї вологості в околиці значень, близьких до гранично-припустимих [11]. Недолік: за результатами вимірів неможливо ідентифікувати причини зміни сигналу з ВП: або це зміна вологості, або це лише зміна інших електрофізичних властивостей зерна, або обидва чинники змінюються одночасно. Це обумовить дуже низьку та неприйнятну для практики статичну точність стабілізації вологості зерна на виході із сушарки.

*«Ручний» лабораторний вимір.* Достоїнство: гарантована стандартизованою процедурою точність виміру вологості. Недоліки: 1) лабораторні дослідження вимагають старанності проведення процедури і значних витрат робочого часу; 2) інформація про вологість як динамічний процес є гратчастою функцією часу  $t_i \in t, i = 1, \infty$  із запізненням, крок квантування якої дорівнює інтервалу відбору проб зерна для визначення вологості, а запізнення дорівнює часу виконання процедури  $\tau^{\text{лаб}}$ . Другий недолік «ручного» визначення вологості зумовлює низьку динамічну точність стабілізації вологості зерна і при управлінні вологістю кваліфікованим уважним оператором, і автоматично регулятором. Це обумовлюється двома чинниками. По-перше, гратчаста функція часу прямо або побічно відновлюється в безперервну з використанням процедури її екстраполяції. Причому частіше така екстраполяція реалізується як фіксація. Так, наприклад, регламентом роботи сушарки ДСП-32 передбачений відбір проб зерна для визначення вологості через кожні дві години, а час перебування зерна в сушарці при її номінальній продуктивності складає приблизно одну годину. По-друге, час запізнення в контурі регулювання, тобто час процедури визначення вологості за ГОСТом 13586.5-85, складає приблизно 1,5...2 години.

З потенційно можливих альтернатив взаємодії автоматичних і «ручних» засобів виміру вологості зерна в потоці, тобто варіантів структури автоматизованої системи виміру, найбільш перспективною і природною для застосування в системах автоматичного управління сушкою зерна є система, яку надано на рис. 5.

Її особливість полягає в тому, що системою управління використовується інформація з автоматичного вологоміра, а його градувальна характеристика (математична модель) періодично коректується за результатами лабораторних вимірів вологості. Вона дозволяє об'єднати сформульовані вище достоїнства процесів (систем) управління вологістю зерна на виході зерносушарок, зберігши як недолік лише витрати ручної праці на процедуру визначення вологості зерна в лабораторії. Найбільш важливі характеристики процедур визначення вологості за ГОСТом 13586.5-85 і ГОСТом 29143-91 наведено у таблиці 1.

Розрахунок вологості зерна  $W_{\zeta}^{\hat{a}\hat{a}}(b_{\zeta})$  при лабораторних вимірах здійснюється за результатами паралельних вимірів вологості двох наважок  $W_{\zeta 1}^{\hat{a}\hat{a}}(b_{\zeta})$  та  $W_{\zeta 2}^{\hat{a}\hat{a}}(b_{\zeta})$ . Їхні результати усереднюються, якщо виконується умова їх збіжності:  $W_{\zeta}^{\hat{a}\hat{a}}(b_{\zeta}) = \left| W_{\zeta 1}^{\hat{a}\hat{a}}(b_{\zeta}) - W_{\zeta 2}^{\hat{a}\hat{a}}(b_{\zeta}) \right| \leq \Delta W_{\zeta \hat{a}\hat{a}\hat{a}}$ .

Для ГОСТ 13586.5-85  $\Delta W_{\zeta}^{\hat{a}\hat{a}\hat{a}} = 0,20$ , для ГОСТ 29143-91  $\Delta W_{\zeta}^{\hat{a}\hat{a}\hat{a}} = 0,15$ .

Якщо попереднє підсушування зерна для помелу наважки не потрібне, то розрахунок вологості наважок ведеться за наступними формулами:

$$W_{\zeta 1}^{\hat{a}\hat{a}}(b_{\zeta}) = \frac{m_{11} - m_{21}}{m_{11}} 100 \% + K; \quad W_{\zeta 2}^{\hat{a}\hat{a}}(b_{\zeta}) = \frac{m_{12} - m_{22}}{m_{12}} 100 \% + K,$$

а з попереднім підсушуванням:

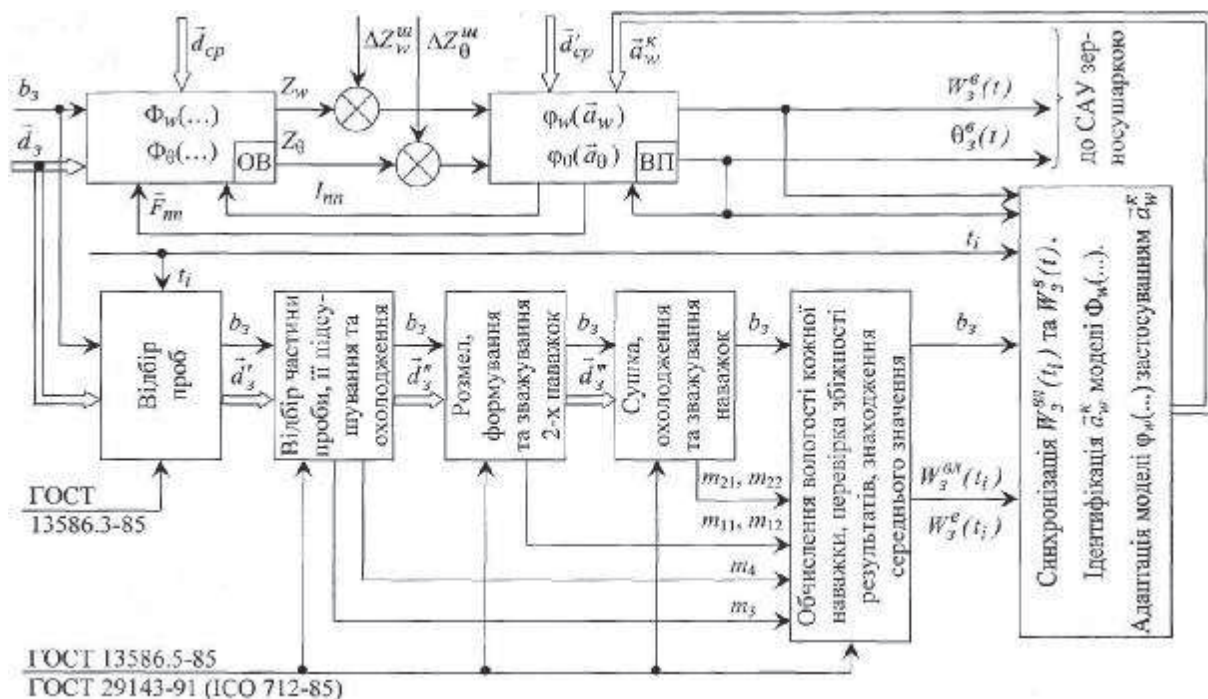


Рис. 5 – Структурна схема автоматизованої системи виміру вологості зерна в потоці (m – маса проб і наважок, перші індекси позначень відповідають індексам за ГОСТом 13586.5-85, п. 5.2)

Таблиця 1 – Найбільш важливі характеристики процедур визначення вологості за ГОСТом 13586.5-85 і ГОСТом 29143-91

№ п/п	№ ГОСТу		ГОСТ 13586.5-85	ГОСТ 29143-91 (ICO 712-85)
	Показник			
1.	Маса проби, яка береться із середньої відібраної для визначення вологості		(300 ± 10) г	не задана
2.	Маса наважок, що формується для попереднього підсушування (кондиціонування)		(20 ± 0,1) г (одна)	мало чим більше 5 г (дві)
3.	Маса наважок, що формується для остаточного висушування		(5 ± 0,05) г	мало чим більше 5 г
4.	Точність виміру мас		10 мг	1 мг
5.	Час попереднього підсушування		за таблицю, в залежності від вологості, від 3 хв.	4 – 7 хв.
6.	Час охолодження після попереднього підсушування		5 хв. в охолоджувачі АУО	не менше 2 годин, без ексикатора
7.	Час остаточного висушування (з моменту досягнення температури 130 <sup>0</sup> С)		60 хв., 90 хв. – кукурудза	120 хв. кукурудза – ні
8.	Час охолодження після остаточного висушування		20 хв. в ексикаторі	30 – 45 хв. в ексикаторі
9.	Загальний час проведення вимірів, не менше		1,5...2 години	4,5...5 годин
10.	Використання у формулі розрахунку вологості поправочних коефіцієнтів для компенсації методичної погрішності		береться за таблицю в залежності від культури (0,1 – 0,45) %	ні
11.	Умова збіжності двох паралельних вимірів (різниця їх результатів)		не більш ± 0,2 %	не більше 0,15 г волиги на 100 г проби, ± 0,15 %
12.	Точність вимірів вологості, що декларується		± 0,5 %	± (0,2 – 0,25) %

$$W_{\zeta 1}^{\ddot{a}a}(b_{\zeta}) = \left(1 - \frac{m_{21}m_4}{m_{11}m_3}\right) 100 \% + K; \quad W_{\zeta 2}^{\ddot{a}a}(b_{\zeta}) = \left(1 - \frac{m_{22}m_4}{m_{12}m_3}\right) 100 \% + K,$$

де  $m_{11}$  і  $m_{12}$  – маси 1-го і 2-го наважок розмеленого зерна до їх висушування;

$m_{21}$  і  $m_{22}$  – маси 1-го і 2-го наважок розмеленого зерна після їх висушування;

$m_3$  і  $m_4$  – маси частини відібраної проби цілого (нерозмеленого) зерна до і після її попереднього підсушування;

$K$  – поправочний коефіцієнт, що компенсує методичну погрішність виміру,  $K = 0,1 \dots 0,45$  для ГОСТу 13586.5-85,  $K = 0$  для ГОСТу 29143-91.

Зв'язок, точніше – *зворотний зв'язок*, між автоматичними і «ручними» (лабораторними) вимірами вологості зерна здійснює блок, який виконує функції синхронізації результатів цих вимірів, ідентифікації поточних значень параметрів  $\vec{a}_w$  моделі  $\Phi_w(\dots)$  об'єкту виміру, адаптації, на основі результатів ідентифікації, параметрів моделі  $\Phi_w(\dots)$  вимірювального пристрою. Адаптація моделі  $\Phi_w(\dots)$ , у межах термінів метрології, є *перекалібруванням* його градуовальної характеристики. Важливо, що це перекалібрування виробляється в умовах електрофізичних властивостей зерна та первинного перетворювача ВП, які безперервно змінюються.

У статистичній, тобто без врахування безперервності змін властивостей ОВ, що ідентифікуються, і витрат часу на проведення еталонних вимірів вологості, методична основа алгоритму ідентифікації близька до основ методу тестових вимірів [12]. У найзагальнішому випадку, відповідно до цього методу, визначення (ідентифікація) скоректованих параметрів  $\vec{a}_w^e$  моделі інформаційного каналу об'єкту виміру, ведеться на основі розв'язання системи рівнянь, отриманих із рівняння цієї моделі (4):

$$\vec{a}_w^e = \arg \begin{cases} \hat{O}_w^i(b_{\zeta}, W_{\zeta 1}^e, \theta_{\zeta 1}^e, \vec{a}_w) = Z_{w_{i1}}^e \\ \hat{O}_w^i(b_{\zeta}, W_{\zeta j}^e, \theta_{\zeta j}^e, \vec{a}_w) = Z_{w_{ij}}^e \\ \hat{O}_w^i(b, W_{\zeta n}^e, \theta_{\zeta n}^e, \vec{a}_w) = Z_{w_{nm}}^e \end{cases}, \quad (7)$$

де  $W_{\zeta i}^e$ ,  $\theta_{\zeta j}^e$  – значення вологості і температури еталонів вологості зерна ( $i$ -тий еталон вологості при  $j$ -тому значенні температури);

$Z_{w_{ij}}^e$  – значення електричного сигналу на виході первинного перетворювача вологості зерна при зміні ним еталонів вологості ( $i$ -тий еталон вологості при  $j$ -тому значенні температури);

$i = 1, n$ ,  $j = 1, m$  – номери еталонів вологості зерна і температур, при яких ці еталони вимірюються.

Очевидно, що кількість рівнянь у системі (7) має дорівнювати розмірності вектора параметрів  $\vec{a}_w$  моделі  $\hat{O}_w^i(\vec{a}_w)$ , які визначаються в результаті її розв'язання.

Підкреслимо принципові відмінності методології ідентифікації параметрів  $\vec{a}_w^*$  і  $\vec{a}_w^e$  із застосуванням процедур (5) і (7) відповідно. При ідентифікації  $\vec{a}_w^*$  її інформативну основу складають результати спеціальним чином організованого *статистичного* експерименту. На основі його результатів обирається вид моделі (проводиться її структурна ідентифікація), визначаються значення  $\vec{a}_w^*$  (параметрична ідентифікація) і перевіряється адекватність вибраної моделі з цими значеннями коефіцієнтів для всіх діапазонів зміни контрольованих і неконтрольованих чинників. При цьому загальна кількість експериментів багатозово перевершує кількість визначуваних коефіцієнтів. При ідентифікації  $\vec{a}_w^e$  значення коефіцієнтів визначаються:

а) для вже вибраного виду моделі;

б) для істотно менших діапазонів варіювання вимірюваних змінних;

в) на інформативній основі, яку складають результати спеціальним чином організованого детермінованого експерименту.

Все це значно спрощує завдання ідентифікації, особливо в тих окремих випадках, коли умови її рішення можна розглядати як вироджені.

**Висновок.** Підкреслимо ще раз, що створення високоефективних систем автоматичного управління процесами сушки зерна вимагає неперервного автоматичного виміру вологості зерна в потоці. Головною вимогою до таких, як і будь-яких інших, вимірів є забезпечення необхідної точності і стабільності метрологічних характеристик каналу виміру. Суть проблеми автоматичних вимірів – неможливість створення метрологічної міри вологості зерна для автоматичних вологомірів.



Для метрологічно обґрунтованих автоматичних вимірів вологості зерна в потоці і стабілізації метрологічних характеристик каналу виміру пропонується реалізація автоматизованої системи вимірів. У такій системі, поряд з каналом автоматичних безперервних вимірів, зберігається канал періодичних лабораторних вимірів, точність яких забезпечено стандартизованою методикою виміру. Це дозволяє реалізувати в системі спеціальний негативний зворотний зв'язок. Функціонування контура цього зворотного зв'язку дозволить вирішити завдання стабілізації точності автоматичних вимірів вологості на рівні точності лабораторних вимірів при змінах в широких діапазонах властивостей зерна і дрейфу характеристик компонентів автоматичного вологоміра.

Наступний етап досліджень – конкретизація алгоритмів функціонування контура зворотного зв'язку для конкретних особливостей зміни вологості зерна на вході і виході зерносушарок.

### Література

1. Хобин В.А., Гапонюк И.О. Измерение влажности зерна в потоке: актуальность, технические средства, проблемы точности, пути решения // Хранение и переработка зерна. – Днепропетровск, 2009. – № 4(70). – С. 41 – 44.
2. Словарь по кибернетике: Св. 2000 ст. / Под ред. В.С. Михалевича. – 2-е изд. – К.: Гл. ред. УСЭ им. М.П. Бажана, 1989. – 751 с.
3. Секанов Ю.П. Влагометрия сыпучих и волокнистых растительных материалов. – М.: ВИМ, 2001. – 189 с.
4. Просянык А.В., Клабуков В.Ф., Соснин К.В. Влагомер зерна в потоке – мал золотник, да дорог // <http://www.dnvpeldorado.dp.ua>
5. Ренгарт И.И. Влагомеры микрорадар – контроль влажности от приемки зерна до готового продукта // <http://microradar.narod.ru/all/physics/mw1/mw1.htm>
6. Лыков А.Г. Исследование и обоснование структуры электронного устройства контроля влажности зерна // <http://masters.donntu.edu.ua/2001/kita/lykov/diss/index.htm>
7. ГОСТ 13586.5-85. Зерно. Метод определения влажности. – Взамен ГОСТ 3040-55 в части метода определения влажности; Введ. 14.11.85. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 8 с.
8. ГОСТ 29143-91 (ИСО 712-85). Зерно и зернопродукты. Определение влажности (рабочий контрольный метод). – Введ. 05.12.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 5 с.
9. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.: ил.
10. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. Рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29-99, Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск: изд-во стандартов. – Москва, 2003. – 50 с.
11. Хобин В.А., Степанов М.Т., Гапонюк И.О. Повышение энергетической эффективности процессов сушки зерна на базе систем гарантирующего управления // Мат. III Международ. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2008». – Москва – Тамбов: Мат. в 2-х т. – Т. 1. – С. 334 – 343.
12. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.

УДК 664:621.1.016

## КІНЕТИКА СУШІННЯ ПШЕНИЦІ В АПАРАТАХ НА БАЗІ ТЕРМОСИФОНІВ

**Бурдо О. Г., д-р техн. наук, професор, Безбах І. В, канд. техн. наук, Донкоглов В. І., асп.  
Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса**

*Розглянуто апарати на базі термосифонів для сушіння. Наведено результати експериментальних досліджень.*

*Devices on the basis of thermosiphons for drying are considered. Results of experimental researches are presented.*

Ключові слова: термосифони, пшениця.