

УДК 631.365.22+621.317

Федотова М.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Скриннік І.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Дідик О.К.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Березюк І.А.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Зубенко В.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Сербул О.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Трушаков Д.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ТЕХНОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СИГНАЛІВ ЗЕРНОСУШАРКИ З КИПЛЯЧИМ ШАРОМ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

Сушіння із застосуванням киплячого шару має величезні переваги в порівнянні з іншими способами. Завдяки тому, що дисперсний матеріал набуває стану «киплячості» – він омивається з усіх сторін, тому сушіння відбувається швидше та з меншими енергетичними витратами. Зерносушарка з киплячим шаром каскадного типу, як показали дослід, являє собою багатовимірний об'єкт з розподіленими параметрами із запізненням. Автоматизувати таку зерносушарку досить складно не лише через швидкоплинність фізичних процесів, що відбуваються в ній, а й через те, що дана сушарка є новою конструкцією, не досить вивченою. Тож дана робота присвячена розробці алгоритму ідентифікації такого виду об'єкту у розрізі математичного опису сигналів «вхід-вихід» з урахуванням динаміки процесів та особливостей конструкції. Також в даній роботі показана практична реалізація розробленої технології на прикладі сушарки для сушіння дисперсного матеріалу в киплячому шарі. В результаті застосування технології був отриманий набір спектральних і взаємноспектральних щільностей сигналів «вхід-вихід», що описують зв'язки параметрів між собою в реальних експлуатаційних умовах. Отримані дані були зведені до таблиць і проаналізовані, а графіки спектральних щільностей – апроксимовані методом логарифмічних характеристик. Спектральні щільності стануть вихідними даними для наступного етапу ідентифікації – визначення матриці передаточних функцій багатовимірного об'єкту з розподіленими параметрами із запізненням.

Ключові слова: киплячий шар, об'єкт автоматизації, каскади, математичне очікування, дисперсія, автокореляційна та взаємно кореляційна функція, спектральна щільність, апроксимація.

Постановка проблеми. Застосування сучасних підходів стосовно автоматизації на підприємствах зернопереробної промисловості дозволяє значно підвищити вихід готової продукції та скоротити витрати. Процес сушіння зерна в Україні у більшості випадків здійснюється за допомогою морально та технічно застарілого спеціалізованого

устаткування. Одним з перспективним та енергозберігаючим способом сушіння в АПК є сушіння із застосуванням киплячим шаром. Фізика процесу сушіння полягає у наступному. Дисперсний матеріал, потрапляючи на перфоровані решітки-каскади, знизу продувається теплоносієм (агентом сушіння) з певною швидкістю так, щоб при цьому

зерно набувало стану «кипіння». Завдяки цьому зерно починає рухатись з каскаду на каскад, віддаючи одночасно надлишок вологи теплоносію. Переваги сушіння в такій зерносушарці очевидні: експозиція сушіння в рази менша в порівнянні з іншими способами, нагрівання матеріалу рівномірне по всій площині зернини за рахунок максимально можливого контакту агента сушки з матеріалом, і як результат – зберігаються всі поживні якості при умові дотримання режимів сушіння. Впровадження автоматизації дозволяє забезпечити точність виконання технологічного процесу. З метою синтезу системи автоматизованого керування сушінням в зерносушарці з киплячим шаром нами були проведені ряд дослідів. Ідентифікація експериментально знятих даних сигналів «вхід-вихід» є необхідною для визначення математичної моделі зерносушарки з киплячим шаром, конструкція якої має свої особливості.

Таким чином, наступним етапом після проведення експерименту, є обробка отриманих даних із застосуванням елементів ідентифікації для побудови математичної моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автоматизація контролю і управління процесами обробки, зберігання та подальшої переробки зернової продукції відкриває широкі можливості для якісного тривалого зберігання продукції, що на сьогодні має величезне значення в умовах воєнного стану. Завдяки застосуванню засобів вимірювання та контролю основних чинників досягається майже 100% збереження стратегічного насіннєвого та продовольчого запасу.

Сушіння у киплячому шарі ще в середині ХХ ст. визнали одним з найпрогресивніших способів сушіння, що застосовується в різних галузях промисловості у т.ч. і для сушіння зернових. Так, при Центральноукраїнському національному технічному університеті (м. Кропивницький) було розроблено принципово нову конструкцію сушарки для сушіння дисперсного матеріалу [1]. Та глибина процесів, що відбуваються в такій сушарці, ще не досить вивчена, тому перед для впровадження автоматизації перш за все необхідно дослідити динаміку сигналів «вхід-вихід» у вигляді математичного опису. Автоматизація нового об'єкту – зерносушальної установки касетного типу з киплячим шаром – перш за все потребує дослідів, в ході яких потрібно виявити зв'язки між вхідними і вихідними величинами, побудову диференціальних рівнянь і визначення математичної моделі об'єкту, тобто його ідентифікацію. З цією метою на кафедрі «Автоматизації вироб-

ничих процесів» Центральноукраїнського національного технічного університету було проведено ряд паралельних дослідів [стаття], які стали основою для застосування розробленої методики ідентифікації складного багатовимірного об'єкту з розподіленими параметрами із запізненням.

Значний вклад у розвиток автоматизації сушіння в киплячому шарі зробили такі визначні науковці як Баскаков А.С., Рашковська Н.Б., Романков П.Г., Забродський С.С., Мартиненко І.І., Федоров В.Г. та ін. Їх наробки в якійсь мірі мають як переваги, так і недоліки [2, 3, 5].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка технології ідентифікації сигналів зерносушарки як об'єкта автоматизації, що являє собою багатовимірну динамічну складну систему із багатьма взаємопов'язаними параметрами та запізненням в основних каналах управління.

Тобто за відомими записами компонентів векторів сигналів керування u_k та вихідних сигналів k -того каскаду x_k , як багатовимірних стаціонарних випадкових процесів [4], необхідно знайти множини матриць їх спектральних S_{uu} , S_{xx} та взаємних S_{ux} , S_{xu} спектральних щільностей.

Виклад основного матеріалу. Зерносушарку з киплячим шаром з урахуванням її конструктивних особливостей можна представити узагальненою структурою так, як показано це на рис 1.

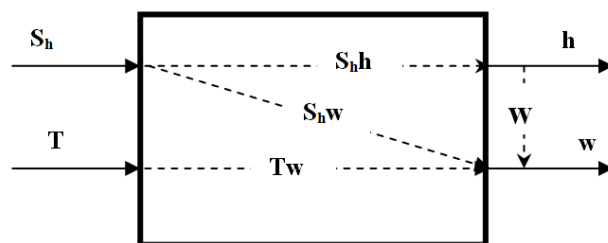


Рис. 1. Схема зв'язків вхідних і вихідних сигналів сушарки з киплячим шаром як об'єкта автоматизації

Тоді основними параметрами зерносушарки як об'єкта автоматизації будуть: sh – зміна положення шиберу, що регулює подачу зерна безпосередньо в камеру сушіння, h – висота шару матеріалу на каскадах, w – кінцева вологість зернового матеріалу, T – температура теплоносія (агента).

В результаті визначення ступеню зв'язку між сигналами виявилось, що значна кореляція спостерігається між параметрами: $S_h - h$, $sh - w$, $T - w$, $h - w$. Суть таких зв'язків очевидна і виходить з фізики процесу, адже зміна положення шиберу S_h , що регулює подачу зерна безпосередньо в камеру сушіння, впливає, перш за все, на висоту шару h матеріалу на каскадах, а, значить, і на кін-

цеву вологість зерна w . Щодо температури агента T , то вплив її спостерігається лише на зміну кінцевої вологості i , аж ніяк, не на зміну висоти матеріалу на каскадах.

$$u_k = \begin{bmatrix} S_h \\ T_7 \end{bmatrix} \quad (1);$$

$$x_k = \begin{bmatrix} h_k \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

Враховуючи вирази (1) та (2) можна стверджувати, що розмір множини матриць S_{uu} дорівнює 1, а розміри множин матриць $S_{x_k x_k}$, S_{ux_k} та $S_{x_k u}$ дорівнюють кількості каскадів, а саме 7.

У відповідності з теоремою Вінера-Хінчина транспоновані матриці спектральних та взаємних спектральних щільностей зв'язані зі спектральними та взаємними спектральними щільностями компонентів векторів (1), (2) наступними рівняннями

$$S_{uu}' = \begin{bmatrix} S_{S_h S_h} & S_{TS_h} \\ S_{S_h T} & S_{TT} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$S_{x_k x_k}' = \begin{bmatrix} S_{h_k h_k} & S_{wh_k} \\ S_{h_k w} & S_{ww} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$S_{ux_k}' = \begin{bmatrix} S_{S_h h_k} & S_{Th_k} \\ S_{S_h w} & S_{Tw} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$S_{x_k u}' = S_{ux_k}'^* ; \quad (6)$$

Позначення у формулах: верхній індекс ' – позначає транспонування матриці [6];

$S_{S_h S_h}$ – спектральна щільність відхилень (СЩВ) положення шиберу від математичного сподівання;

S_{TT} – СЩВ відхилень температури теплоносія біля сьомого каскаду від математичного сподівання;

S_{TS_h} – взаємна спектральна щільність (ВСЩ) між відхиленнями температури теплоносія біля сьомого каскаду від математичного сподівання та відхиленнями положення шиберу від його математичного сподівання;

$S_{S_h T}$ – ВСЩ між відхиленнями положення шиберу від його математичного сподівання та відхиленнями температури теплоносія біля сьомого каскаду від її математичного сподівання;

$S_{h_k h_k}$ – СЩВ висоти киплячого шару біля k -того каскаду від її математичного сподівання;

S_{ww} – СЩВ вологості насіння від її математичного сподівання;

$S_{h_k w}$ – ВСЩ між відхиленнями висоти киплячого шару над k -тим каскадом від її математичного сподівання та відхиленнями вологості насіння на виході з ЗКШ від її математичного сподівання;

тичного сподівання та відхиленнями вологості насіння на виході з ЗКШ від її математичного сподівання;

S_{wh_k} – ВСЩ між відхиленнями вологості насіння на виході з ЗКШ від її математичного сподівання та відхиленнями висоти киплячого шару над k -тим каскадом від її математичного сподівання;

$S_{S_h h_k}$ – ВСЩ між відхиленнями положення шиберу від його математичного сподівання та відхиленнями висоти киплячого шару над k -тим каскадом від її математичного сподівання;

S_{Th_k} – ВСЩ між відхиленнями температури теплоносія біля сьомого каскаду від математичного сподівання та відхиленнями висоти киплячого шару над k -тим каскадом від її математичного сподівання;

$S_{S_h w}$ – ВСЩ між відхиленнями положення шиберу від його математичного сподівання та відхиленнями вологості насіння на виході з ЗКШ від її математичного сподівання;

S_{Tw} – ВСЩ між відхиленнями температури теплоносія біля сьомого каскаду від математичного сподівання та відхиленнями вологості насіння на виході з ЗКШ від її математичного сподівання;

нижній індекс * – позначає операцію Ермітового спряження.

Таким чином завдання ідентифікація сигналів «вхід-вихід» зерносушарки зведено до того, щоб за відомими записами зміни сигналів S_h , T , h_k та w обмеженої довжини, як стаціонарних ергодичних випадкових процесів, знайти оцінки їх спектральних та взаємних спектральних щільностей.

Для розв'язання цієї задачі використано алгоритм Блекмена-Т'юкі, оскільки цей метод в умовах обмеженої довжини реалізації сигналу забезпечує можливість отримати слушну і незміщену оцінку їх спектральних щільностей.

Суть цього алгоритму полягає в наступному.

Якщо випадкова функція $x(t)$ приймає значення x_i в кожен момент часу $i\Delta t$ (Δt – час дискретизації, $i=0, \dots, n$; n – кількість точок заміру), то оцінка її спектральної щільності S_{xx} може бути знайдена за формулою:

$$S_{xx}(f_k) = \Delta t \left[\bar{R}_{xx}(0) + 2 \sum_{r=1}^{m-1} \bar{R}_{xx}(r\Delta t) \cos\left(\frac{\pi k r}{m}\right) + \bar{R}_{xx}(m\Delta t) \cos(\pi k) \right], \quad (7)$$

де f_k – частота, що визначається рівнянням

$$f_k = \frac{k}{2m\Delta t}; \quad \bar{R}_{xx} - \text{згладжена оцінка автокореляційної функції (АКФ) } R_{xx}; \quad R_{xx} - \text{незгладжена оцінка}$$

АКФ; k – номер частоти; r – зсув, $r=0, \dots, m$; m – кількість точок по частоті f_k .

Якщо скористатись для визначення згладженої оцінки спектральної щільності $\bar{R}_{xx}$ вікном Хеннінга $v_m(r\Delta t)$, то

$$v_m(r\Delta t) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi r \Delta t}{m} \right), \quad (8)$$

$$\bar{R}_{xx}(r\Delta t) = v_m(r\Delta t) R_{xx}(r\Delta t) \quad (9)$$

Незгладжену оцінку автокореляційної функції можна відшукати так:

$$R_{xx}(r\Delta t) = \frac{1}{n-r-1} \sum_{p=0}^{n-r-1} \dot{x}_i \dot{x}_{i-r}, \quad (10)$$

тут $\dot{x}_i$, $\dot{y}_i$ – значення центрованих випадкових функцій, такі що: $\dot{x}_i = x_i - m_x$,

m_x – математичне очікування випадкової функції $x(t)$, що знаходиться згідно наступного виразу:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i. \quad (11)$$

Незміщена та слушна оцінка дисперсії стаціонарної ергодичної функції:

$$D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2, \quad (12)$$

а її середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (13)$$

У разі, коли випадкові процеси $x(t)$ та $y(t)$ взаємозалежні, може бути визначена міра їх взаємного впливу у вигляді оцінки взаємної спектральної щільності S_{xy} :

$$S_{xy}(f_k) = C_{xy}(f_k) + jQ_{xy}(f_k) \\ |S_{xy}(f_k)| = \sqrt{(C_{xy}(f_k))^2 + (Q_{xy}(f_k))^2}, \quad (14)$$

де $C_{xy}(f_k)$ – ко-спектр взаємного амплітудного спектру (дійсна частина S_{xy}); $Q_{xy}(f_k)$ – квадратурний спектр взаємного амплітудного спектру (уявна частина S_{xy}), які визначаються згідно наступних виразів:

$$C_{xy}(f_k) = \frac{\Delta t}{2} \left[A_{xy}(0) + 2 \sum_{r=1}^{m-1} A_{xy}(r\Delta t) \cos\left(\frac{\pi k r}{m}\right) + A_{xy}(m) \cos(\pi k) \right] \\ Q_{xy}(f_k) = \frac{\Delta t}{2} \left[B_{xy}(0) + 2 \sum_{r=1}^{m-1} B_{xy}(r\Delta t) \sin\left(\frac{\pi k r}{m}\right) + B_{xy}(m) \sin(\pi k) \right] \quad (15)$$

де $A_{xy}(r\Delta t)$ – вектор згладжених оцінок суми кореляційних функцій;

$B_{xy}(r\Delta t)$ – вектор згладжених оцінок різниці кореляційних функцій, що шукаються з рівнянь:

$$A_{xy}(r\Delta t) = \bar{R}_{xy}(r\Delta t) + \bar{R}_{yx}(r\Delta t) \\ B_{xy}(r\Delta t) = \bar{R}_{xy}(r\Delta t) - \bar{R}_{yx}(r\Delta t), \quad (16)$$

де $\bar{R}_{xy}(r\Delta t)$ – згладжена оцінка взаємно кореляційної функції $R_{xy}(r\Delta t)$;

$\bar{R}_{yx}(r\Delta t)$ – згладжена оцінка взаємної кореляційної функції $R_{yx}(r\Delta t)$;

$$R_{xy}(r\Delta t) = \frac{1}{n-r-1} \sum_{i=1}^{n-r-1} \dot{x}_i \dot{y}_{i+r} \\ R_{yx}(r\Delta t) = \frac{1}{n-r-1} \sum_{i=1}^{n-r-1} \dot{x}_{i+r} \dot{y}_i \quad (17)$$

Після цього потрібно виконати перевірку відповідності отриманих оцінок спектральних щільностей сигналів «вхід-вихід» лінійному фізично реалізованому об'єкту. Така перевірка заснована на використанні наступної нерівності, що охоплює усю множину частот f_k :

$$S_{xx}(f_k) S_{yy}(f_k) \geq S_{xy}(f_k) S_{yx}(f_k). \quad (18)$$

У разі, якщо нерівність (18) не виконується, то оцінки спектральних та взаємних спектральних щільностей для конкретної частоти f_k відкидаються як промахи.

Отримані таким чином оцінки авто- і взаємно спектральних щільностей (ВСЩ) складають основу визначення аналітичних функцій, які відповідають даним оцінкам. Для їх знаходження необхідно виконати апроксимацію графіків відповідних оцінок на класі дробово-раціональних функцій комплексного аргументу $s = j\omega$.

Використовуючи положення теорії ймовірності та математичної статистики у програмі MatLab було отримано наступні результати досліджень:

- записи (масиви) зміни вхідних $S_h(t) = (S_{h1}, \dots, S_{hn})$, $T(t) = (T_1, \dots, T_n)$ та вихідних $h_k(t) = (h_{k1}, \dots, h_{kn})$, $w(t) = (w_1, \dots, w_n)$ сигналів по-каскадно, з урахуванням того, що $S_{hi} = S_h(i\Delta t)$, $T_i = T(i\Delta t)$, $h_i = h(i\Delta t)$, $w_i = w(i\Delta t)$, $k=1, \dots, 7$ (каскади), $i=0, \dots, n$ такої довжини, щоб найбільша низькочастотна складова мала 5-10 періодів;

- визначені математичні сподівання сигналів m_{S_h} , m_T , m_{h_k} , m_w «вхід-вихід» як об'єкта моделювання зерносушарки;

- знайдена дисперсія сигналів D_{S_h} , D_T , D_{h_k} , D_w , а також квадрат значення відповідних дисперсій, що і є середньоквадратичним відхиленням функцій σ_x ;

- визначені кореляційні функції вхідних сигналів $R_{S_h S_h}$, R_{TT} , вихідних сигналів $R_{h_k h_k}$, R_{ww} та взаємно кореляційні функції їх комбінацій $R_{S_h h_k}$, $R_{S_h w}$, R_{Tw} , R_{wh_k} ;

- визначені оцінки спектральних $S_{S_h S_h}$, S_{TT} , $S_{h_k h_k}$, S_{ww} і взаємно спектральних $S_{S_h h_k}$, $S_{S_h w}$, S_{Tw} , S_{wh_k} щільностей експериментально отриманих сигналів.

Процес обробки експериментальних даних виконано у два етапи. На першому етапі в результаті застосування алгоритму Блекмена-Т'юки до реалізацій компонентів векторів сигналів керування та вихідних сигналів отримані оцінки відповідних кореляційних функцій та спектральних щільностей для усіх елементів множини об'єктів керування. Дискретне перетворення Фур'є згладжених оцінок кореляційних та взаємних кореляційних функцій дозволило розрахувати оцінки спектральних та взаємних спектральних щільностей відповідних сигналів. Апроксимація оцінок спектральних та взаємних спектральних щільностей методом узагальнених логарифмічних частотних характеристик дозволила визначити математичний опис цих сигналів у вигляді спектральних щільностей, графіки деяких з них показані на рис 2.

В результаті апроксимації методом узагальнених логарифмічних частотних характеристик були отримані вирази (19)-(27):

$$S_{S_h S_h} = k_{S_h} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2, \quad (19)$$

$$S_{T T} = k_T \left| \frac{(s + a_1)(s + b_2)}{(s + b_3)(s^2 + 2d_1 b_4 s + b_4^2)} \right|^2, \quad (20)$$

$$S_{h_k h_k} = k_{h_k} \left| \frac{(s + c_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2, \quad (21)$$

$$S_{w w} = k_w \left| \frac{1}{(s + a_9)} \right|^2, \quad (22)$$

$$S_{S_h h_k} = k_{S_h h_k} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_5)}{(s + a_6)}, \quad (23)$$

$$S_{S_h w} = k_{S_h w} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_7)}{(s + a_8)}, \quad (24)$$

$$S_{T w} = k_{T w} \left| \frac{(s + a_3)(s + b_2)}{(s + b_3)(s^2 + 2d_1 b_4 s + b_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_7)}{(s + a_8)}, \quad (25)$$

$$S_{w h_k} = k_{w h_k} \left| \frac{(s + u_1)(s + u_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s^2 + 2d_2 a_4 s + a_4^2)(s^2 + 2d_3 b_5 s + b_5^2)}{(s + u_3)(s + u_4)}, \quad (26)$$

$$S_{h_n h_{n+1}} = k_{h_n h_{n+1}} \frac{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s^2 + 2d_4 p_4 s + p_4^2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \quad (n=1, 2, \dots, 6) \quad (27)$$

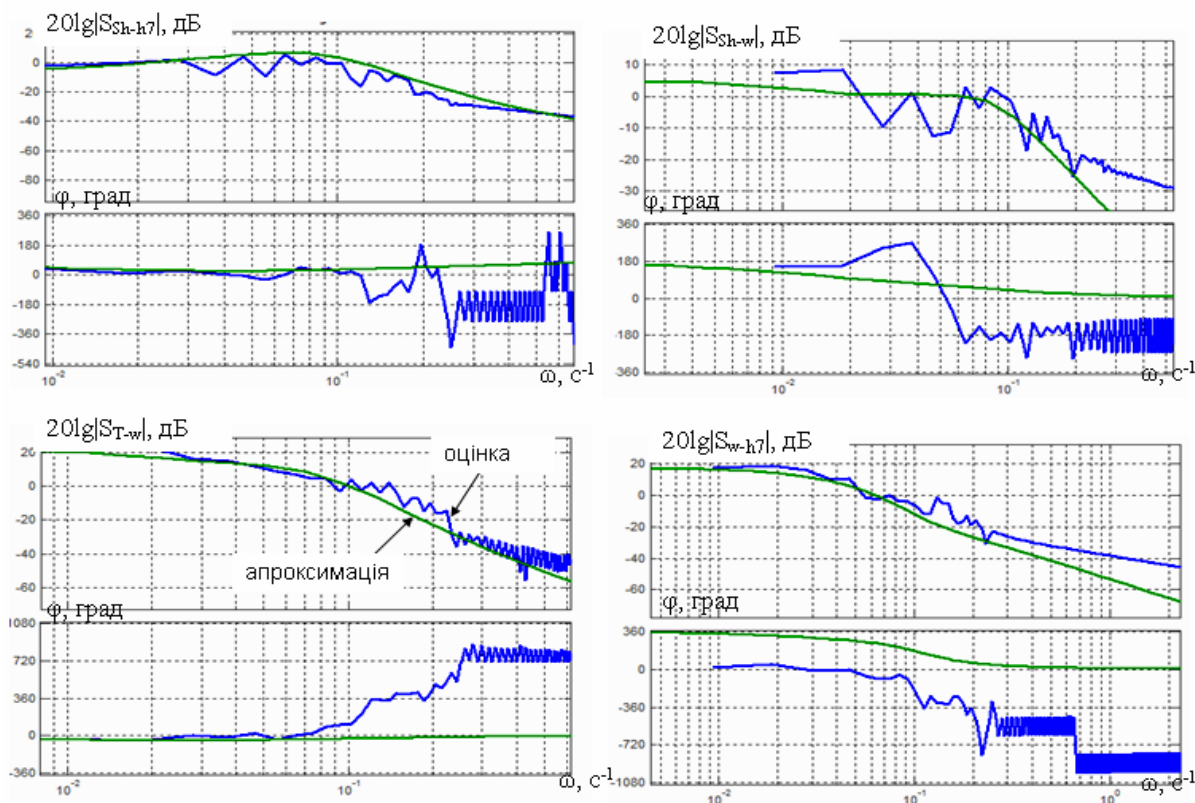


Рис 2. Апроксимація деяких взаємних спектральних щільностей

Таблиця 1

Зміна параметрів взаємної спектральної щільності висот киплячого шару між каскадами

Спектр. щільн	$k_{h_n h_{n+1}}$	p_1, C^{-1}	p_2, C^{-1}	p_3, C^{-1}	p_4, C^{-1}
$S_{h_1 h_2}$	$-2.57 \cdot 10^{-2}$	-0.08	0.045	-0.4	0.25
$S_{h_2 h_3}$	$-1.44 \cdot 10^{-2}$	-0.1075	0.05952	-0.5	0.2
$S_{h_3 h_4}$	$-1.28 \cdot 10^{-2}$	-0.1075	0.05952	-0.5	0.2
$S_{h_4 h_5}$	$-1.13 \cdot 10^{-2}$	-0.054	0.02976	-0.4	0.3
$S_{h_5 h_6}$	$-0.42 \cdot 10^{-2}$	-0.08064	0.045	-0.6	0.3
$S_{h_6 h_7}$	$-0.42 \cdot 10^{-2}$	-0.054	0.029	-0.5	0.35

Таблиця 2

Передаючі коефіцієнти спектральних щільностей, що не змінюються, по-каскадно

Спектр. щільн	k_{S_h}	Спектр. щільн	k_T	Спектр. щільн	$k_{S_{h_w}}, \%/M$	Спектр. щільн	$k_{T_w}, \%/^{\circ}C$	Спектр. щільн	k_w
$S_{S_h S_h}$	-5.8×10^{-4}	S_{TT}	-1.9×10^{-3}	$S_{S_{h_w}}$	-3.75×10^{-4}	S_{T_w}	-3.5×10^{-4}	S_{ww}	-1.08×10^{-2}

Таблиця 3

Параметри спектральних щільностей, що змінюються по-каскадно

Спектр. щільн	$k_{S_h h_k} \times 10^{-4}$	a_5, C^{-1}	a_6, C^{-1}	Спектр. щільн	$k_{h_k} \times 10^{-3}$	c_1, C^{-1}	Спектр. щільн	$k_{wh_k}, \times 10^{-3} \%/M$	u_1, C^{-1}	$u_2, \times 10^{-4} C^{-1}$	$u_3, \times 10^{-4} C^{-1}$
$S_{S_h h_1}$	-6.04	0.15	0.022	S_{h_1}	-1.4	0.2	S_{wh_1}	-3.13	0.2	25	90
$S_{S_h h_2}$	-4.9	0.1	0.018	S_{h_2}	-0.6	0.207	S_{wh_2}	-1.7	0.151	19	90
$S_{S_h h_3}$	-4.17	0.1	0.018	S_{h_3}	-0.63	0.2	S_{wh_3}	-1.95	0.2	10	15
$S_{S_h h_4}$	-3.6	0.09	0.03	S_{h_4}	-2.05	0.07	S_{wh_4}	-1.4	0.15	10	12
$S_{S_h h_5}$	-3.2	0.05	0.022	S_{h_5}	-6.34	0.1	S_{wh_5}	-1.39	0.2	10	19
$S_{S_h h_6}$	-3.1	0.08	0.022	S_{h_6}	-8.1	0.02	S_{wh_6}	-1.94	0.1	12	15
$S_{S_h h_7}$	-2.98	0.09	0.026	S_{h_7}	-8.9	0.09	S_{wh_7}	-2.18	0.1	12	15

Числові значення параметрів спектральної щільності (СЩ), що змінюються при зміні відстані Δ від шиберу завантаження до центру мас каскаду, наведено у табл. 1-3, де $a_1 = 0.025$; $a_2 = 0.4$; $a_3 = 0.05$; $a_4 = 0.09$; $a_7 = 0.07$; $a_8 = 0.01$; $a_9 = 0.012$; $b_2 = 0.0055$; $b_3 = 0.006$; $b_4 = 0.08$; $b_5 = 0.14$; $d_1 = 0.6$; $d_2 = 0.4$; $d_3 = 0.5$; $d_4 = 0.3$; $u_4 = 0.03$.

Висновки: Отримані описи сигналів «вхід-вихід» у вигляді спектральних та взаємноспектральних щільностей стануть вихідними даними

для виконання наступного етапу ідентифікації динаміки зерносушарки з киплячим шаром як об'єкта автоматизації. В результаті чого планується отримання набору матриць передаючих функцій зерносушарки з киплячим шаром у розрізі кожного каскаду, тобто з урахуванням розподіленості та багато вимірності. Наступний етап передбачатиме також отримання математичного опису збурень, що діють на сушарку з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах.

Список літератури:

1. Федотова М.О. Автоматизація процесу стабілізації висоти киплячого шару насіння у зерносушарці за неповними вимірами: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.13.07. Кропивницький, 2017. 276 с.
2. Sergey Osadchy, Valentina Zubenko, Marianna Fedotova. Synthesis of an Optimal Stochastic Stabilization System for an Unstable Multivariable Object with Time Delays in Controls. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), October, 16-18, 2018 Kyiv, Ukraine. P. 114-118
3. Trushakov, D., Kozlovskiy, O., Rendzinyak, S., Fedotova, M., Korud, V. Automated System for Measuring the Temperature of the Desiccator Proceedings of 2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2020, 2020, 9238716 Conference Paper.
4. Федотова М.О., Скриннік І.О., Осадчий С.І., Трушаков Д.В. Ідентифікація сигналів як один з етапів синтезу системи стабілізації висоти киплячого шару в зерносушарці «Системні технології» 4 (135) 2021 «System technologies» [DOI 10.34185/1562-9945-4-135-2021-09]
5. Трушаков Д., Козловський О., Рендзіняк С., Коруд В., Федотова М. Автоматизована система фільтрації завад під час вимірювання температури сушильної шафи. Електроніка та інформаційні технології. 2021. Випуск 15. С. 80–89 Electronics and information technologies. 2021. Issue 15. P. 80–89 [<http://elit.lnu.edu.ua/en/15/8.html>]
6. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий, монография. К.: НАУ, 2006. 438 с

Fedotova M.O., Skrynnik I.O., Didyk O.K., Berezyuk I.A., Zubenko V.O., Serbul O.M., Trushakov D.V. TECHNOLOGY OF IDENTIFICATION OF SIGNALS OF A BRAIN DRYER WITH A FLUID LAYER AS AN OBJECT OF AUTOMATION AND ITS PRACTICAL IMPLEMENTATION

Fluidized bed drying has great advantages over other methods. Due to the fact that the dispersed material acquires a state of "boiling" – it is washed on all sides, so drying is faster and with less energy. Cascading fluid bed dryers have been shown to be a multidimensional object with delayed distributed parameters. It is difficult to automate such a grain dryer not only because of the rapidity of physical processes occurring in it, but also because this dryer is a new design, not sufficiently studied. Therefore, this work is devoted to the development of an algorithm for the identification of this type of object in terms of mathematical description of the signals "input-output", taking into account the dynamics of processes and design features. This paper also shows the practical implementation of the developed technology on the example of a dryer for drying dispersed material in a fluidized bed. As a result of the application of the technology, a set of spectral and cross-spectral densities of "input-output" signals was obtained, which describe the relationships of the parameters with each other in real operating conditions. The obtained data were summarized in tables and analyzed, and the graphs of spectral densities were approximated by the method of logarithmic characteristics. Spectral densities will be the starting point for the next stage of identification – determining the matrix of transfer functions of a multidimensional object with distributed parameters with a delay.

Key words: Fluidized bed, automation object, cascades, mathematical expectation, variance, autocorrelation and cross-correlation function, spectral density, approximation