

М.О. Федотова, І.О. Скриннік, І.А. Березюк,
Д.В. Трушаков, В.О. Зубенко, О.М. Сербул

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ
СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ БАГАТОВИМІРНОГО ОБ'ЄКТА
З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ І ЗАПІЗНЕННЯМ**

Анотація. Робота присвячена наступному етапу визначення опису динаміки зерносушарки з киплячим шаром як багатовимірного об'єкта з розподіленими параметрами із запізненням. Завдяки застосуванню методики структурно-параметричної ідентифікації отримано багатовимірну матрицю передаточних функцій зерносушарки та збурень, що діють на неї в реальних експлуатаційних умовах, що стане основою для синтезу системи автоматичного регулювання сушаркою.

Ключові слова. Киплячий шар, зерносушарка, каскади, теплоносій, спектральна щільність, сигнали «вхід-вихід», система автоматичного керування, матриця передаточних функцій, збурення.

Постановка проблеми. Проводячи аналіз результатів досліджень та вивчивши конструкції зерносушарок на відповідність вимогам сушіння, нами було встановлено, що в них, зазвичай, нагрів зерна нерівномірний, процес сушки надто затяжний, тому якісні параметри готового продукту мають низькі показники. Найбільшу відповідність у простоті, надійності конструкції та відсутності травматизму і перегрівання насіння з позиції забезпечення високих показників технологічної ефективності є *сушіння в киплячому шарі*, завдяки чому підвищується продуктивність обладнання та зменшуються енергетичні втрати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету була розроблена сушарка для сушіння дисперсного матеріалу у киплячому шарі. Фото такої сушарки подано на рис. 1. Завдяки універсальності дана сушарка може застосовуватись для сушіння зернових та олійних культур.

Процес сушіння в такій сушарці відбувається наступним чином: зерно, потрапляючи на верхній каскад (№1) під дією напору повітря, що подається знизу конструкції з певною швидкістю через перфоровані касети (решета), починає розрихлюватись, збільшується в об'ємі і рухається з верхнього каскаду на каскад нижній (№7), нагадуючи собою в'язку речовину.

Автоматизація контролю і управління процесами обробки і зберігання зерна відкриває широкі можливості для підвищення ефективності використання, збільшення продуктивності поточних ліній, подальшого зниження затрат праці і покращення якості обробки зерна.

Глибина процесів, що відбуваються в киплячому шарі, ще не досить вивчена, а установки, в основу яких покладено принцип киплячого стану – не ідентифіковані. Автоматизація нового об'єкту – зерносушильної 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 ідентифікувати. Тому на кафедрі «Автоматизації виробничих процесів» Центральноукраїнського національного технічного університету було проведено ряд паралельних дослідів, які стали основою для застосування розробленої методики ідентифікації складного багатовимірного об'єкту з розподіленими параметрами із запізненням.



Рисунок 1 – Фото сушарки з киплячим шаром

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].

Мета дослідження. На шляху синтезу системи автоматичного управління зерносушаркою з киплячим шаром, що являє собою [4] багатовимірний об'єкт з розподіленими параметрами із запізненням, необхідно виконати другий етап ідентифікації – це визначення математичної моделі сушарки у вигляді матриць передаточних функцій по каналам, що описують «вхід-вихід» об'єкта з урахуванням особливостей сушарки та знайдених спектральних та взаємоспектральних щільностей згаданих сигналів раніше знайдених.

Викладення основного матеріалу дослідження. Основними величинами (вхід-вихід) сушарки є: sh - зміна положення шибера, що регулює подачу матеріалу безпосередньо в камеру сушіння, V - висота шару матеріалу на каскадах, w - кінцева вологість зернового матеріалу, T – температура теплоносія (агента).

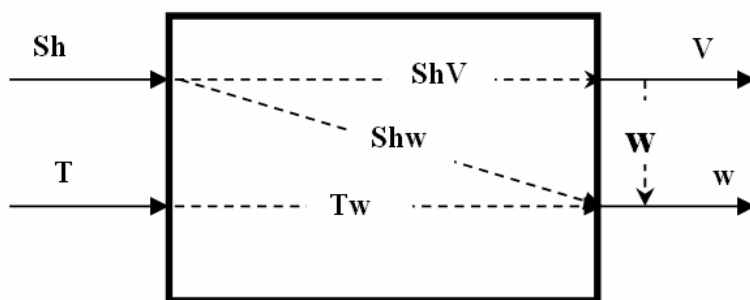


Рисунок 2 – Схема зв'язків вхідних і вихідних сигналів зерносушарки як об'єкта автоматизації

Ідентифікацію динаміки сушарки будемо проводити із застосування структурно-параметричної ідентифікації, сенс якої полягає у тому, щоб за відомими спектральними щільностями вимірних сигналів S_{ShSh} , S_{TT} , $S_{h_k h_k}$, S_{ww} і їх взаємними спектральними щільностями $S_{Sh h_k}$, $S_{Sh w}$, S_{Tw} , $S_{Sh w}$ та S_{wh_k} визначити структуру і параметри матриці передаточних функцій F_{11}^k . Спектральні і взаємно спектральні щільності було знайдено в роботі [4]

Для визначення матриці передаточних функцій кожного з елементів множини моделей динаміки зерносушарки і матриці спектральних щільностей

збурень, що діють на відповідний елемент матриці в процесі роботи, був застосований метод ідентифікації з монографії [6].

Результат. Відповідно до цієї методики вихідними даними для розв'язання поставленої задачі є транспоновані матриці спектральних щільностей $(S^k_{uu})'$, $(S^k_{xx})'$ та взаємних спектральних щільностей $(S^k_{ux})'$ сигналів «вхід-вихід» зерносушарки, сформовані для каскаду з номером k . Нижче показано поетапне застосування зазначеної методики на прикладі каскаду №7. Решта розрахованих таким чином моделей об'єкта і збурень на основі даних інших шести каскадів наведені наведені у [1].

Згідно технології виконаємо підстановку виразів спектральних щільностей у відповідне рівняння, в результаті чого знайдемо наступні матриці S_{uu}^{-1} , S'_{ux} та S_{xx} для сьомого каскаду

$$S_{uu}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{-1718.2642(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)}{(s+0.025)(s-0.025)(s+0.4)(s-0.4)} & 0 \\ 0 & \frac{-512.8649(s+0.006)(s-0.006)(s^2+0.096s+0.0064)(s^2-0.096s+0.0064)}{(s+0.5)(s-0.5)(s+0.0055)(s-0.0055)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S'_{ux} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0003(s+0.025)(s-0.025)(s+0.09)(s+0.4)(s-0.4)}{(s+0.026)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ 0 \\ \frac{-0.00037(s+0.025)(s-0.025)(s+0.07)(s+0.4)(s-0.4)}{(s+0.009)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.00035(s+0.5)(s-0.5)(s+0.07)(s+0.0055)(s-0.0055)}{(s+0.01)(s+0.006)(s-0.006)(s^2+0.096s+0.0064)(s^2-0.096s+0.0064)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S_{xx} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0009(s+0.09)(s-0.09)(s+0.4)(s-0.4)}{(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.0022(s+0.0012)(s+0.1)(s^2-0.072s+0.0081)(s^2-0.14s+0.0196)}{(s+0.0015)(s+0.03)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.0022(s-0.0012)(s-0.1)(s^2+0.072s+0.0081)(s^2+0.14s+0.0196)}{(s+0.0015)(s+0.03)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.010843}{(s-0.012)(s+0.012)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Наступним кроком є формування матриці S'_{yy} ,

$$S'_{yy} = \begin{bmatrix} -0.0058 \left| \frac{(s+0.4)(s+0.025)}{(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \right|^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.00195 \left| \frac{(s+0.5)(s+0.055)}{(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)} \right|^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Факторизація рівняння зв'язку, дозволила отримати матрицю $S_{\Delta x}$

$$S_{\Delta x} = \begin{bmatrix} \frac{0.027(s+0.1523)(s^2+0.1357s+0.0071)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} & \frac{0.072894(s+0.026)(s^2+0.036s+0.0088)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.01025(s+0.003)(s+0.096)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} & \frac{0.072281(s+0.09194)(s^2+0.046s+0.0041)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

В результаті факторизації матриці S'_{yy} була отримана матриця D

$$D = \begin{bmatrix} \frac{0.024124(s+0.025)(s+0.4)}{(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0.044157(s+0.5(s+0.0055))}{(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Матриця T має наступну структуру

$$T = \begin{bmatrix} T(1.1) & T(1.2) & T(1.3) & T(1.4) \\ T(2.1) & T(2.2) & T(2.3) & T(2.4) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де компоненти матриці (7) $T(i,j)$ описуються як

$$\begin{aligned} T(1.1) &= \frac{0.012393(s+0.4)(s+0.09)(s+0.025)}{(s+0.026)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(2.1) &= \frac{0.015539(s+0.4)(s-0.07)(s+0.025)}{(s+0.009)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(1.2) &= 0 \\ T(2.2) &= \frac{0.0079383(s+0.5)(s+0.07)(s+0.0055)}{(s+0.01)(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)} \\ T(1.3) &= \frac{0.027247(s+0.1523)(s^2+0.1357s+0.007055)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(2.3) &= \frac{0.072894(s+0.02641)(s^2+0.03614s+0.008788)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(2.4) &= \frac{0.0723(s+0.09194)(s^2+0.04594s+0.004096)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тоді, виконавши сепарацію виразу (7), знайдемо $T_0 + T_+$

$$T_0 + T_+ = \begin{bmatrix} \{T_0 + T_+\}(1.1) & \{T_0 + T_+\}(1.2) & \{T_0 + T_+\}(1.3) & \{T_0 + T_+\}(1.4) \\ \{T_0 + T_+\}(2.1) & \{T_0 + T_+\}(2.2) & \{T_0 + T_+\}(2.3) & \{T_0 + T_+\}(2.4) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де елементи матриці (3.8) мають наступний вигляд

$$\begin{aligned}\{T_0 + T_+\} (1.1) &= \frac{0.012393 (s+0.4) (s+0.09) (s+0.025)}{(s+0.026)(s+0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\} (2.1) &= \frac{0.015539 (s+0.4)(s-0.07)(s+0.025)}{(s+0.009)(s+0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\} (1.2) &= 0; \\ \{T_0 + T_+\} (2.2) &= \frac{0.0079383 (s+0.5)(s+0.07) (s+0.0055)}{(s+0.01) (s+0.006) (s^2 + 0.096s + 0.0064)};\end{aligned}\quad (10)$$

$$\begin{aligned}\{T_0 + T_+\} (1.3) &= \frac{0.027247 (s+0.1523) (s^2 + 0.1357s + 0.007055)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\} (2.3) &= \frac{0.072894(s+0.02641)(s^2 + 0.03614s + 0.008788)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\} (1.4) &= \frac{-0.01025(s+0.003)(s+0.096)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\} (2.4) &= \frac{0.0723(s+0.09194)(s^2 + 0.04594s + 0.004096)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}.\end{aligned}\quad (11)$$

Завершальним кроком методики ідентифікації є визначення шуканої блочної матриці Φ , структура якої наступна: $\Phi=[F_{11}, F_{12}]$, де матриця передаточних функцій від вектору сигналів керування до вектору вихідних координат F_{11} дорівнює

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{0.51373e-05(s+0.09)}{(s+0.03)} & 0 \\ \frac{0.64413e-02(s-0.07)}{(s+0.01)} & \frac{0.17955(s+0.07)}{(s+0.01)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1(\Delta)(s+w_1(\Delta))}{s+w_2(\Delta)} e^{-s\tau_{S_hh}(\Delta)} & 0 \\ \frac{\alpha_2(s-\varphi)}{s+p_2} e^{-s\tau_{Shw}} & \frac{\alpha_3(s+\varphi)}{s+p_2} e^{-s\tau_{Tw}} \end{bmatrix}; \quad (12)$$

де τ_{S_hh} , τ_{S_hw} , τ_{Tw} – запізнення між сигналами «вхід-вихід»: шибєр – висота матеріалу на кожному каскаді ($S_h - h$), шибєр – вологість ($S_h - w$), температура – вологість ($T - w$) відповідно. В табл. 1 зведені дані по всім семи каскадам.

А матриця передаточних функцій формувального фільтру збурень F_{12} виглядає

$$F_{12} = \begin{bmatrix} \frac{2.7247e-05(s+0.1523)(s^2+0.1357s+0.007055)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} & \frac{-1.025e-05(s+0.002993)(s+0.09572)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ \frac{0.072894(s+0.02641)(s^2+0.03614s+0.008788)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} & \frac{0.072281(s+0.09194)(s^2+0.04594s+0.004096)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} \end{bmatrix}$$

Таблиця 1

Параметри елементів матриці F_{11}^k

Каскад (k)	α_1 , м/м $\times 10^{-1}$	α_2 , %/м $\times 10^2$	α_3 , %/°C	w_1 , с ⁻¹	w_2 , с ⁻¹	φ , с ⁻¹	p_2 , с ⁻¹	Δ , м $\times 10^{-2}$
№1	1.0389	0.64413	0.17955	0.15	0.022	0.07	0.01	15
№2	0.83932	0.64413	0.17955	0.1	0.015	0.07	0.01	30
№3	0.7166	0.64413	0.17955	0.1	0.018	0.07	0.01	45
№4	0.62788	0.64413	0.17955	0.09	0.02	0.07	0.01	60
№5	0.55393	0.64413	0.17955	0.085	0.022	0.07	0.01	75
№6	0.53007	0.64413	0.17955	0.08	0.025	0.07	0.01	90
№7	0.51373	0.64413	0.17955	0.09	0.026	0.07	0.01	105

де каскад №1 – верхній, каскад №7 – найнижчий; Δ – відстань між каскадами

Висновки. Отримані таким чином матриці передаточних функцій зерносушарки дозволяють розпочати процедуру синтезу системи автоматичного керування з урахування особливостей сушарки, а саме: багатовимірності, розподіленості та запізненості в каналах керування.

ЛІТЕРАТУРА

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., Kozlovskyi, 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

tronics 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

REFERENCES

1. Fedotova MO Automation of the process of stabilizing the height of the fluidized bed of seeds in the grain dryer by incomplete dimensions: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.13.07. Kropyvnytskyi, 2017. 276 p.
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., Kozlovskyi, 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. Fedotova MO, Skrynnik IO, Osadichy SI, Trushakov DV Identification of signals as one of the stages of synthesis of the fluidized bed height stabilization system in the grain dryer "System Technologies" 4 (135) 2021 «System technologies» [DOI 10.34185/1562-9945-4-135-2021-09]
5. Trushakov D. Kozlovsky O., Rendzinyak S., Korud V., Fedotova M Automated noise filtration system during drying cabinet temperature measurement. Electronics and information technology. 2021. Issue 15. pp. 80–89 Electronics and information technologies. 2021. Issue 15. P. 80–89 [http://elit.lnu.edu.ua/en/15/8.html]
6. Azarskov VN Methodology of designing optimal systems of stochastic stabilization / V.N. Азарсков, Л.Н. Blokhin, L.S. Zhitetsky, monograph. K .: NAU, 2006. 438 p

Received 18.02.2022.

Accepted 21.02.2022.

***Application of the method of structural-parametric identification to determine
the of mathematical model of a multidimensional object
with distributed parameters and delay***

Drying is one of the most responsible and energy-intensive post-harvest grain processing operations. The constant rise in heat prices has led to the search for new designs of grain dryers, or improvements to existing ones. Studies of well-known scientists such as Romankov, Rezchikov, Rashkovskaya have proven the potential effectiveness of using a fluidized bed for drying grain.

The degree to which this drying efficiency approaches the potential is determined by how much the change in the actual humidity of the material during drying approaches the theoretical drying curve at the same resource consumption and the same initial state of the material to be dried.

Taking into account the provisions of the theory of optimal control indicates that maximizing the accuracy of stabilization of a given value of the height of the fluidized bed should be achieved by developing an optimal multidimensional stabilization system of the specified height. The basis for solving the first of these is the study of the design of a fluidized bed grain dryer.

The decomposition of the grain dryer allows to present it in the form of a set of multidimensional objects with pure delay. The size of this set is determined by the number of cascades, and the dynamic characteristics of its elements depend on the distance of the cascade to the gate Δ .

Automation of control and management of processes of processing and storage of grain opens wide opportunities for increase of efficiency of use, increase of productivity of current lines, further reduction of labor costs and improvement of quality of processing of grain. If today most of the known dryers have their own mathematical model, this fluidized bed dryer is new, incompletely studied and therefore needs its own mathematical description in order to develop a system of automatic control of its parameters.

Therefore, this paper shows the practical application of the technique of identification of signals "input-output" of the dryer for the dispersed material of the cascade type. According to the spectral and mutual spectral densities of the signals, using the technology of structural-parametric identification, a matrix of transfer functions of the dryer was found, which is a multidimensional dynamic object with distributed parameters with delay, which is affected by various perturbing factors.

Федотова Маріанна Олександрівна - асистент Центральноукраїнського національного технічного університету.

Скриннік Іван Олександрович - доцент Центральноукраїнського національного технічного університету.

Березюк Ірина Анатоліївна - доцент Центральноукраїнського національного технічного університету.

Трушаков Дмитро Володимирович - доцент Центральноукраїнського національного технічного університету.

Зубенко Валентина Олександрівна - доцент Центральноукраїнського національного технічного університету.

Сербул Олександр Миколайович - доцент Центральноукраїнського національного технічного університету.

Fedotova Marianna - assistant Central Ukrainian National Technical University.

Skrynnik Ivan - associate professor Central Ukrainian National Technical University.

Berezyuk Irina - associate professor Central Ukrainian National Technical University.

Trushakov Dmitro - associate professor Central Ukrainian National Technical University.

Zubenko Valentyna - associate professor Central Ukrainian National Technical University.

Serbul Olexandr - associate professor Central Ukrainian National Technical University.