

УДК 631.365.22+621.317

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/40>

Федотова М.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Мацуї А.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Трушаков Д.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Сербул О.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Березюк І.А.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Скриннік І.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ТЕХНОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДИНАМІКИ БАГАТОВИМІРНОГО ОБ'ЄКТА ТА ЇЇ ПРИКЛАДНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Розв'язок задачі декомпозиції дозволив представити зерносушарку з киплячим шаром у вигляді множини багатовимірних об'єктів з чистим запізненням. Розмір цієї множини визначається кількістю каскадів, а динамічні характеристики її елементів залежать від відстані решета до шиберу завантаження.

Застосування частотного методу структурної ідентифікації професора Блохіна Л.М. дозволив оцінити модель динаміки зерносушарки з киплячим шаром у вигляді множини систем лінеаризованих звичайних диференціальних рівнянь та множини матриць спектральних щільностей збурень. Кожна з систем рівнянь та кожна матриця спектральних щільностей мають однакову структуру та різні параметри. Закони зміни параметрів в залежності від відстані до шиберу завантаження визначені методом найменших квадратів на основі результатів ідентифікації.

Дана робота присвячена одному з наступних етапів ідентифікації динаміки зерносушарки касетного типу з киплячим шаром як об'єкта автоматизації з розподіленими параметрами із запізненням, в результаті чого було отримано матриці передаточних функцій зерносушарки по-каскадно від її входу до виходу, використовуючи відому технологію структурно-параметричної ідентифікації багатовимірних об'єктів. Вихідними даними для такої технології стали матриці спектральних та взаємносектральних щільностей сигналів «вхід-вихід» сушарки, які були отримані у попередній статті журналу.

Застосувавши методи сепарації, факторизації, виділення полюсів за Девісом – ми отримали опис динаміки зерносушарки з киплячим шаром у розрізі кожного з семи каскадів. Аналіз отриманих даних дозволив стверджувати, що структура матриці передаточних функцій по-каскадно ідентична, а параметри змінюються та ґрунтуються на законах фізики.

Ключові слова: киплячий шар, зерносушарка, автоматизація, матриця передаточних функцій, спектральна щільність.

Постановка проблеми. Сушіння зерна в активну фазу збору врожаю є стратегічною задачею, адже зерно необхідно висушити так, щоб воно зберігалось доволі тривалий період (3-4 роки). Якість зернового матеріалу, що направляється до сховища, залежить не лише від природніх факторів, а й, головним чином, від режимів сушіння. В умовах війни роботи по приведенню зерна в стійкий стан потребують значної швидко-

дії, особливо в зонах з підвищеною небезпекою. Якщо вивезти врожай не вдається, то в нагоді стають мобільні зерносушарки, завдяки яким невеликі партії зерна швидко висушуються до потрібної вологості. Швидким способом сушіння в мобільних зерносушарках є спосіб киплячого шару. Переваги його відомі вже давно [1]. Для забезпечення якісного процесу сушіння в зерносушарці з киплячим шаром (ЗКШ) необхідно роз-

робити систему автоматичного керування, впровадження якої гарантуватиме отримання показників висушеної продукції в межах норми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментами в області сушіння дисперсних матеріалів, зокрема зернових, та розробкою на їх основі систем автоматизації займалися такі провідні діячі науки та техніки як Федоров В.Г., Баскаков А.С., Рашковська Н.Б., Романков П.Г. та ін. На кафедрі механізації сільського господарства Центральноукраїнського національного технічного університету була розроблена нова конструкція зерносушарки для сушіння дисперсного матеріалу (зерна, насіння соняшника, сої, кукурудзи тощо) в киплячому шарі. Особливістю такої конструкції стали змінні каскади-решета з варійованим кутом їх нахилу відносно горизонталі (в залежності від матеріалу, який потрібно висушити) та осадова камера, що дає можливість сушіння матеріалу безпосередньо з поля уникаючи витрат на попереднє очищення зерна від домішок.

Формулювання цілей статті.

Задача структурно-параметричної ідентифікації ЗКШ як об'єкта автоматизації полягає у тому, щоб за знайденими спектральними щільностями вимірних сигналів [2] $S_{S_n h_k}$, S_{TT} , $S_{h_k h_k}$, S_{ww} і їх взаємними спектральними щільностями $S_{S_n h_k}$, $S_{S_n w}$, S_{T_w} , $S_{S_n w}$ та $S_{w h_k}$ визначити структуру і параметри матриці передаточних функцій (МПФ) F_{11}^k для кожного k-того каскаду зерносушарки з киплячим шаром.

Виклад основного матеріалу.

Для визначення матриць передаточних функцій кожного з елементів множини моделей динаміки зерносушарки і матриць спектральних щільностей (МСЩ) збурень, що діють на відповідний елемент в процесі роботи, був застосований метод ідентифікації з монографії [3]. Відповідно до цієї методики базовою інформацією для розв'язання поставленого завдання є транспоновані матриці СЩ (S_{uu}^k), (S_{xx}^k) та ВСЩ (S_{ux}^k) сигналів «вхід-вихід» зерносушарки, що були сформовані для каскаду з номером k. Застосуємо згадану методику з монографії для нашого випадку, а саме для каскаду № 7.

Враховуючи технологію з монографії [3] та вихідні дані [2] матриці S_{uu}^{-1} , S'_{ux} та S_{xx} для сьомого каскаду мають вигляд:

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

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

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

Далі формуємо матрицю S'_{yy} .

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

В результаті факторизації знайденої матриці отримаємо матрицю D

$$D = \begin{bmatrix} \frac{0.024124(s+0.025)(s+0.4)}{(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0.044157(s+0.5)(s+0.0055)}{(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Факторизація рівняння зв'язку (див монографію) дозволила отримати матрицю $S_{\Delta x}$

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

Матриця T має наступну структуру

$$T = \begin{bmatrix} T(1.1) & T(1.2) & T(1.3) & T(1.4) \\ T(2.1) & T(2.2) & T(2.3) & T(2.4) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де складові матриці (6) $T(i,j)$ визначені як

$$\begin{aligned} T(1.1) &= \frac{0.012393(s+0.4)(s+0.09)(s+0.025)}{(s+0.026)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(2.1) &= \frac{0.015539(s+0.4)(s-0.07)(s+0.025)}{(s+0.009)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(1.2) &= 0 \\ T(2.2) &= \frac{0.0079383(s+0.5)(s+0.07)(s+0.0055)}{(s+0.01)(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)} \\ T(1.3) &= \frac{0.027247(s+0.1523)(s^2+0.1357s+0.007055)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(2.3) &= \frac{0.072894(s+0.02641)(s^2+0.03614s+0.008788)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \\ T(2.4) &= \frac{0.0723(s+0.09194)(s^2+0.04594s+0.004096)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} \end{aligned}. \quad (7)$$

Виконавши сепарацію виразу (6), знайдемо $T_0 + T_+$

$$T_0 + T_+ = \begin{bmatrix} \{T_0 + T_+\}(1.1) & \{T_0 + T_+\}(1.2) & \{T_0 + T_+\}(1.3) & \{T_0 + T_+\}(1.4) \\ \{T_0 + T_+\}(2.1) & \{T_0 + T_+\}(2.2) & \{T_0 + T_+\}(2.3) & \{T_0 + T_+\}(2.4) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де елементи виразу (8) мають вигляд, поданий нижче:

$$\begin{aligned} \{T_0 + T_+\}(1.1) &= \frac{0.012393(s+0.4)(s+0.09)(s+0.025)}{(s+0.026)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(2.1) &= \frac{0.015539(s+0.4)(s-0.07)(s+0.025)}{(s+0.009)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(1.2) &= 0; \\ \{T_0 + T_+\}(2.2) &= \frac{0.0079383(s+0.5)(s+0.07)(s+0.0055)}{(s+0.01)(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)}; \\ \{T_0 + T_+\}(1.3) &= \frac{0.027247(s+0.1523)(s^2+0.1357s+0.007055)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(2.3) &= \frac{0.072894(s+0.02641)(s^2+0.03614s+0.008788)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(1.4) &= \frac{-0.01025(s+0.003)(s+0.096)}{(s+0.05)(s+0.03)(s^2+0.108s+0.0081)}; \\ \{T_0 + T_+\}(2.4) &= \frac{0.0723(s+0.09194)(s^2+0.04594s+0.004096)}{(s+0.012)(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)}. \end{aligned}. \quad (9)$$

Кінцевим етапом методики ідентифікації є визначення шуканої блочної матриці Φ . Комбінація виразів (5) і (6) дозволяє відшукати матрицю Φ , що має структуру $\Phi = [F_{11}, F_{12}]$, де МПФ від вектору керування до вектору вихідних координат F_{11} дорівнює

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{0.51373e - 05(s + 0.09)}{(s + 0.03)} & 0 \\ \frac{0.64413e - 02(s - 0.07)}{(s + 0.01)} & \frac{0.17955(s + 0.07)}{(s + 0.01)} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

а МПФ формувального фільтру збурень F_{12} має вигляд:

$$F_{12} = \begin{bmatrix} \frac{2.7247e-05 (s+0.1523) (s^2 + 0.1357s + 0.007055)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} & \frac{-1.025e-05 (s+0.002993) (s+0.09572)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} \\ \frac{0.072894 (s+0.02641) (s^2 + 0.03614s + 0.008788)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} & \frac{0.072281 (s+0.09194) (s^2 + 0.04594s + 0.004096)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

При відшуканій матриці (11) транспоновану матрицю збурень, які діють на каскаді №7, можна визначити, скориставшись формулою $S'_{\Psi\Psi} = F_{12}F_{12}^*$.

Ідентичні розрахунки були проведені і по решті 6-ти каскадам. Порівняльний аналіз матриць F_{11}^k та F_{12}^k по всім 7-ми каскадам дозволив визначити, що всі вони мають загальну структуру, параметри елементів якої різняться:

$$F_{11}^k = \begin{bmatrix} F_{11}(1,1) & F_{11}(1,2) \\ F_{11}(2,1) & F_{11}(2,2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1(\Delta)(s + w_1(\Delta)) e^{-\tau_{S_h h}(\Delta)}}{s + w_2(\Delta)} & 0 \\ \frac{\alpha_2(s - \phi) e^{-\tau_{S_h w}}}{s + p_2} & \frac{\alpha_3(s + \phi) e^{-\tau_{Tw}}}{s + p_2} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де $\tau_{S_h h}$, $\tau_{S_h w}$, τ_{Tw} – запізнення між сигналами «вхід-вихід»: шибер – висота матеріалу на кожному каскаді ($S_h - h$), шибер – вологість ($S_h - w$), температура – вологість ($T - w$) відповідно.

Варіювання параметрів матриці F_{11}^k у розрізі кожного каскаду зведено до табл. 1, звідки стає видно, що елементи $F_{11}(2,1)$ та $F_{11}(2,2)$ не змінюють своїх коефіцієнтів по-каскадно, на відміну від $F_{11}(1,1)$. Незмінність параметрів можна пояснити тим, що і температура агента сушіння, і вологість матеріалу вимірюються лише в одній точці, а не по-каскадно. А наявність ланки I-порядку в чисельнику і знаменнику їхніх передаточних функцій пояснюється тим, що дана зерносушарка призначена для сушки вологого матеріалу, тому і володіє здатністю накопичувати в собі теплову

енергію (володіє ємністю та інерційністю), в результаті чого відбувається випаровування зайвої вологи спочатку з зовнішніх, а потім і з внутрішніх шарів насіння.

Елемент $F_{11}(1, 1)$ характеризує зв'язок висоти шару насіння зі зміною положення шиберу. Виконавши апроксимацію даних табл. 1 методом найменших квадратів у середовищі Matlab [5], отримані наступні аналітичні вирази

$$\alpha_1(\Delta) = 0,07107 \cdot e^{-0,04036 \cdot \Delta} + 0,06863 \cdot e^{-0,003224 \cdot \Delta}, \quad (13)$$

$$w_1(\Delta) = 0,4482 \cdot e^{-0,147 \cdot \Delta} + 0,1037 \cdot e^{-0,002148 \cdot \Delta}, \quad (14)$$

$$w_2(\Delta) = 0,06535 \cdot e^{-0,1396 \cdot \Delta} + 0,01232 \cdot e^{-0,007514 \cdot \Delta}, \quad (15)$$

$$\tau_{Sh-h}(\Delta) = 33,25 \cdot \Delta + 111,4. \quad (16)$$

Ступінь відповідності отриманих залежностей експериментальним даним характеризують графіки, представлені на рис. 1 разом з 95 відсотковими довірчими границями.

Те, що елемент $F_{11}(1,1)$ представляє собою поєднання аперіодичної та форсуєчої ланок пояснюється інерційністю реагування, яка виникає через властивість каскаду накопичувати зернову масу до деякого значення h (так як кут нахилу решета невеликий і складає 5-8°), розподіляти її по всій площі каскаду, а потім, під дією сили земного тяжотіння, переміщувати її з каскаду на каскад.

Зміна частоти $w_1(\Delta)$ за законом (14) пояснює те, що на швидкість зміни положення регулюючого органу відразу ж реагує перший каскад, а на решту каскадів – через деякий час по мірі потрапляння зерна з першого каскаду, ця швидкість має вплив поступовий і, практично, однаковий. Частота $w_2(\Delta)$ характеризує частоту зрізу каскаду зерносушарки за зміною положення шиберу. На нижньому каскаді, найбільш віддаленому від шиберу завантаження, висота киплячого матеріалу в стані кипіння змінюється найбільш інтенсивно, далі – інтенсивність зміни спадає за законом (16). Коефіцієнт α_1 змінюється згідно виразу (13), адже максимальний вплив регулюючого органу (шиберу) на висоту зерна спостерігається саме на першому

Таблиця 1

Параметри елементів матриці F_{11}^k

Каскад (k)	$\alpha_1, \text{м/м} \times 10^{-1}$	$\alpha_2, \text{\%/м} \times 10^2$	$\alpha_3, \text{\%/}^\circ\text{C}$	$w_1, \text{с}^{-1}$	$w_2, \text{с}^{-1}$	$\phi, \text{с}^{-1}$	$p_2, \text{с}^{-1}$	$\Delta, \text{м} \times 10^{-2}$
№ 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.

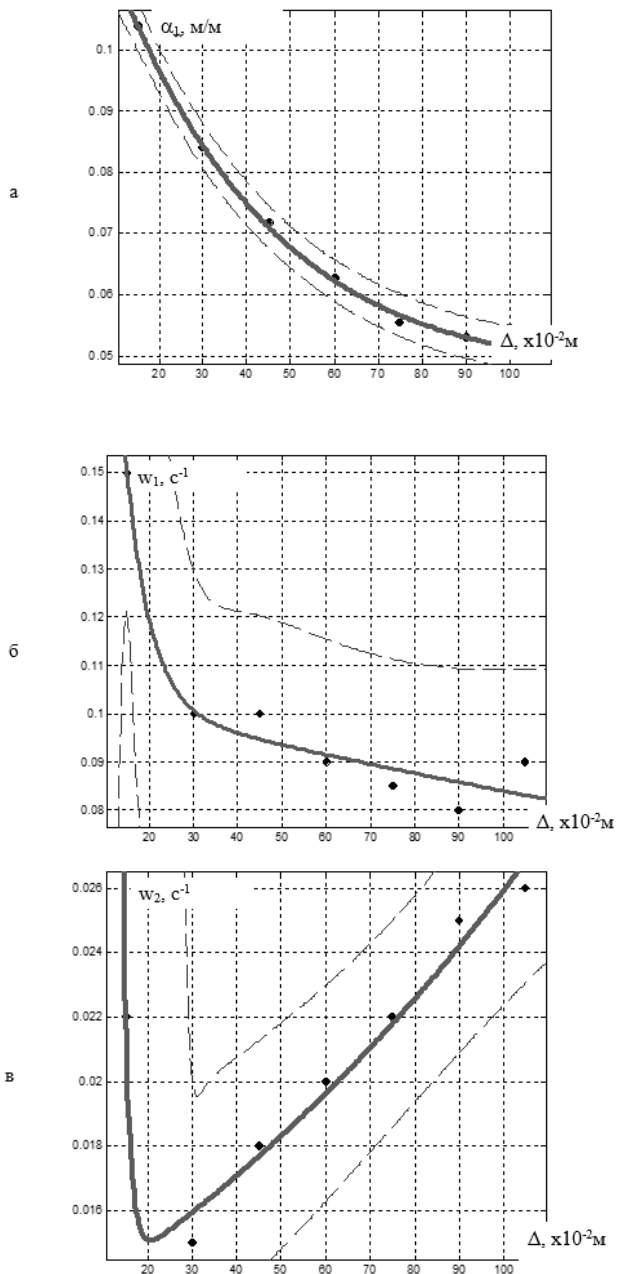


Рис. 1. Апроксимація змінних параметрів елемента $F_{11}(1, 1)$

каскаді (перша точка на графіку), а вже потім, як видно, на інші послідовні решета вплив його спадає за експонентою.

Величина $\tau_{s,h}$ елемента $F_{11}(1, 1)$ являє собою запізнення, і так як розміри 7-ми каскадів ідентичні між собою, то закон зміни описується лінійною функцією (16).

Виходячи з вищезгаданого, висота зернового матеріалу на каскадах змінюється в сукупності з усіма чинниками по-різному, судячи зі зміни параметрів, але загальна структура передаточної функції по каналу S_h-h залишається незмінною.

Застосуємо алгоритм виділення полюсів ліворуч за Девісом [6] з МПФ (12) для визначення матриць P_k і M_k для усіх 7-ми каскадів. Структура поліноміальних матриць P_k ідентична і описується ось так:

$$P_k = \begin{bmatrix} a_{11}(s + \omega_{11}) & a_{12}(s + \omega_{12}) \\ -a_{21}(s + \omega_{11}) & -a_{22}(s + \omega_{12}) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

а параметри цієї матриці змінюються по мірі віддалення від шибера завантаження. Характер цієї зміни визначає функція задана таблицею 2.

Тоді обернена матриця P_k^{-1} має наступну структуру:

$$P_k^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{(s + \omega_{11})} & \frac{A_{12}}{(s + \omega_{11})} \\ -\frac{A_{21}}{(s + \omega_{12})} & -\frac{A_{22}}{(s + \omega_{12})} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

де A_{ij} – чисельник елементів матриці (див табл. 3)

Виконаємо деякі легкі перетворення і отримаємо P_k^{-1} , але вже в іншому виді:

$$P_k^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{\omega_{11}} & \frac{A_{12}}{\omega_{11}} \\ \frac{1}{\omega_{11}} \frac{1}{s + \frac{\omega_{11}}{\omega_{11}}} & \frac{1}{\omega_{11}} \frac{1}{s + \frac{\omega_{11}}{\omega_{11}}} \\ \frac{A_{21}}{\omega_{12}} & \frac{A_{22}}{\omega_{12}} \\ \frac{1}{\omega_{12}} \frac{1}{s + \frac{\omega_{12}}{\omega_{12}}} & \frac{1}{\omega_{12}} \frac{1}{s + \frac{\omega_{12}}{\omega_{12}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{(T_{11}s + 1)} & \frac{k_{12}}{(T_{11}s + 1)} \\ -\frac{k_{21}}{(T_{12}s + 1)} & -\frac{k_{22}}{(T_{12}s + 1)} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

де T_{11}, T_{12} – сталі часу; $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ – коефіцієнти передачі відповідних елементів матриці P_k^{-1} .

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів матриці P_k

$\Delta, \text{ м}$ $\times 10^{-2}$	a_{11} $\times 10^3$	a_{12}	a_{21} $\times 10^3$	a_{22}	ω_{11}	ω_{12}
15	83,9599	216,6667	89,8438	252,0114	0,022	0,01
30	297,9483	412,5	223,5294	325,7572	0,015	0,01
45	221,977	253,125	140,2439	173,8294	0,018	0,01
60	219,8316	187,5	114,2857	109,6619	0,02	0,01
75	219,9545	148,9583	96,5608	76,1428	0,022	0,01
90	198,8475	112,5	78,7879	54,8616	0,025	0,01
105	176,3198	112,5	72,2656	56,0782	0,026	0,01

Таблиця 3

Значення елементів матриці P_k^{-1}

$\Delta, \text{ м}$ $\times 10^{-2}$	A_{11} $\times 10^{-3}$	A_{12}	A_{21} $\times 10^{-3}$	A_{22}
15	0,14888	0,128	0,053077	0,049601
30	0,067126	0,085	0,046061	0,061395
45	0,056312	0,082	0,045432	0,07191
60	0,04094	0,07	0,042667	0,08207
75	0,032204	0,063	0,040839	0,093027
90	0,026821	0,055	0,038519	0,097214
105	0,031902	0,064	0,041111	0,10031

Таблиця 4

Значення елементів матриці M_k по-каскадно

$\Delta, \text{ м}$ $\times 10^{-2}$	α_{11} $\times 10^{-2}$	α_{12}	α_{21} $\times 10^{-2}$	α_{22}	γ_{11}	γ_{12}	γ_{21}
15	226,7874	38,9025	255,6668	45,2487	0,01462	0,01032	0,07
30	515,7776	74,0644	397,4427	58,4897	0,01242	0,01025	0,07
45	322,1141	45,4486	212,4675	31,211	0,01395	0,01041	0,07
60	258,8022	33,6656	142,3942	19,6898	0,01533	0,01063	0,07
75	217,7879	26,7455	102,5338	13,6714	0,01671	0,01086	0,07
90	177,8677	20,1994	77,1011	9,8504	0,01889	0,01125	0,07
105	163,0454	20,1994	73,2467	10,0688	0,01889	0,0111	0,07

Матриця M_k має в своєму складі запізнення по основним каналам керування і вигляд її загальний для всіх каскадів ($\tau_1 = \tau_{S,h}$; $\tau_2 = \tau_{S,w}$; $\tau_3 = \tau_{T,w}$)

$$M_k = \begin{bmatrix} \alpha_{11}(s + \gamma_{11})e^{-\tau_1 s} & \alpha_{12}(s + \gamma_{12})e^{-\tau_2 s} \\ -\alpha_{21}(s + \gamma_{21})e^{-\tau_3 s} & -\alpha_{22}(s + \gamma_{12})e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Параметри елементів матриці M_k змінюються при зміні відстані до шибера заванта-

ження, що можна відобразити за допомогою табл. 4

Висновки. Застосування розробленої методики структурно-параметричної ідентифікації і відповідного їй програмно-технічного комплексу дозволило визначити структуру і параметри МПФ ЗКШ, дослідити та проаналізувати зміну параметрів елементів матриці передаточних функцій у розрізі кожного каскаду

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. Федотова М.О., Скриннік І.О., Дідик О.К., Березюк І.А., Зубенко В.О., Сербул О.М., Трушаков Д.В. Технологія ідентифікації сигналів зерносушарки з киплячим шаром як об'єкта автоматизації та її практична реалізація Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» Том 33 (72) № 2, 2022, с. 133-140
3. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий, монография. К.: НАУ, 2006. 438 с
4. 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.
5. Федотова М.О., Скриннік І.О., Осадчий С.І., Трушаков Д.В. Ідентифікація сигналів як один з етапів синтезу системи стабілізація висоти киплячого шару в зерносушарці «Системні технології» 4 (135) 2021 «System technologies» [DOI 10.34185/1562-9945-4-135-2021-09]
6. M.C. Davis, Factoring the spectral matrix, IEEE Trans. Automat. Control 8 (1963).

Fedotova M.O., Matsui A.M., Trushakov D.V., Serbul O.M., Berezyuk I.A., Skrynnik I.O. TECHNOLOGY OF IDENTIFICATION OF THE DYNAMICS OF A MULTIDIMENSIONAL OBJECT AND ITS APPLICATION

The solution of the decomposition problem made it possible to present a grain dryer with a fluidized bed in the form of a set of multidimensional objects with a net 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 sieve to the loading shutter.

Application of the frequency method of structural identification of professor L.M. Blokhin. made it possible to evaluate the model of the dynamics of a fluidized bed grain dryer in the form of a set of systems of linearized ordinary differential equations and a set of matrices of spectral densities of disturbances. Each of the systems of equations and each matrix of spectral densities have the same structure and different parameters. The laws of changing parameters depending on the distance to the loading shutter are determined by the method of least squares based on the identification results.

This work is devoted to one of the next stages of identifying the dynamics of a fluidized-bed cassette type grain dryer as an automation object with distributed parameters with a delay, as a result of which the matrices of the transfer functions of the grain dryer were obtained in a cascade from its input to the output, using the well-known technology of structural-parametric identification of multidimensional objects. The initial data for this technology became the matrices of the spectral and cross-spectral densities of the "input-output" signals of the dryer, which were obtained in the previous article of the magazine.

By applying the methods of separation, factorization, allocation of poles according to Davis, we obtained a description of the dynamics of a grain dryer with a fluidized bed in a section of each of the seven cascades. The analysis of the obtained data made it possible to state that the structure of the matrix of transfer functions is identical in cascade, and the parameters change and are based on the laws of physics.

Key words: *fluidized bed, grain dryer, automation, matrix of transfer functions, spectral density.*