

Застосування спектрального методу структурної ідентифікації для визначення математичної моделі багатовимірного об'єкту

В даній статті вперше виведено матриці передаточних функцій об'єкта керування – зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах, а також визначено закон зміни їх параметрів від координати, що характеризує місце розташування каскаду.

киплячий шар, агент сушки, каскади, математична модель, спектральна щільність, ідентифікація об'єкта, апроксимація, оптимальна САУ, сепарація, факторизація матриць

Сушарки киплячого шару ефективно застосовуються для сушки дисперсних матеріалів у харчовій, хімічній, вугільній промисловості, сушки будівельних матеріалів.

Так, при Кіровоградському національному технічному університеті розроблено принципово новий вид сушарки, призначеної для сушки зернових у *псевдозрідженому* стані (рис 1). Якщо через шар зернистого матеріалу, що розміщений на решітках (каскадах), пропускати теплоносії з певною швидкістю, то щільний шар збільшується в об'ємі, розрихлюється і набуває стану кипіння.

Проведені дослідження [1] в котрій раз підтвердили необхідність розробки системи автоматичного управління (САУ) процесом створення киплячого шару, адже саме від його наявності і залежить ефективність сушки.

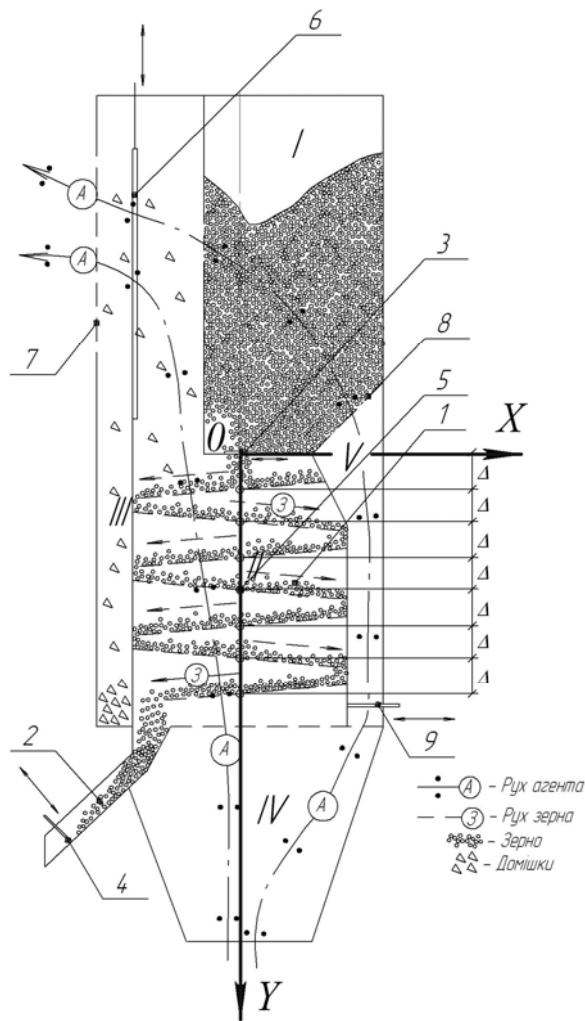
Аналіз літературних джерел показав, що для розробки такої САУ, яка б забезпечувала найкращу якість стабілізації киплячого шару в реальних експлуатаційних умовах, необхідно застосовувати методи динамічного проектування оптимальних систем. Вихідними даними для таких методів є математичні моделі об'єкта керування і збурюючих діянь.

Якщо на сьогодні більшість відомих нам зерносушарок (ЗСУ) мають свою математичну модель [2], то запропонована зерносушарка з киплячим шаром є новою, неповністю вивченою і тому потребує свого математичного опису.

Так як реалізації вхідних і вихідних параметрів являють собою стаціонарні ергодичні випадкові процеси [4], то мета даної статті полягає у побудові такого математичного опису об'єкта керування, який би дозволив застосувати методологію викладену в [3].

Для досягнення цієї мети будемо вважати, що вихідними сигналами (параметрами контролю і регулювання) для даної зерносушарки є висота матеріалу на кожному з 7-ми каскадів V_1-V_7 і кінцева його вологість w , що контролюється лише на виході з сушарки. До вхідних сигналів (керуючих параметрів) віднесемо переміщення шибєру sh , що регулює завантаження сушильної камери, і температуру агента T . Головними джерелами збурень нехай є коливання фізичних параметрів теплоносія (температура, вологовміст, швидкість і т.д.).

Пов'яжемо з об'єктом керування прямокутну систему координат ХОУ так, як це показано на рис 1. Зміна положення шибєру sh , який регулює подачу зерна в камеру сушіння, впливає по-різному, перш за все, на висоту шару матеріалу V_1-V_7 на кожному з 7-ми каскадів, рівновіддалених один від одного на величину Δ [см], а вже потім, і на кінцеву вологість зерна w , на яку безпосередньо впливає і температура теплоносія T .



I – завантажувальний бункер (камера попереднього нагріву);
 II – сушильна камера;
 III – осадова камера;
 IV – конфузори для нагнітання агента;
 V – камера для направлення теплоносія у завантажувальний бункер;

1 – каскади-касети (решета);
 2 – патрубок для вивантаження просушеного матеріалу;
 3 – шибер вивантаження зерна в сушильну камеру;
 4 – шибер вивантаження просушеного зерна;
 5 – шарніри;
 6 – шибер для відводу відпрацьованого теплоносія;
 7 – сітка відводу відпрацьованого агента;
 8 – сітка для потрапляння теплоносія в камеру попереднього нагріву;
 9 – шибер для надходження агента в камеру попереднього нагріву.

• A – Рух агента
 — З – Рух зерна
 * – Зерна
 Δ – Дрішки

Рисунок 1 – Конструкція ЗСУ касетного типу для сушки зернових в киплячому шарі

Такий об'єкт можна представити у вигляді структурної схеми, зображеної на рис. 2. Тоді, згідно схеми, матриця передаточних функцій ЗСУ F_{11} повинна описувати зв'язки між вимірними сигналами, а саме:

$$\begin{bmatrix} Sh \\ T \end{bmatrix} \cdot F_{11} = \begin{bmatrix} V \\ w \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{де } F_{11} = \begin{bmatrix} F_{11}(1, 1) & F_{11}(1, 2) \\ F_{11}(2, 1) & F_{11}(2, 2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$F_{11}(1, 1)$, $F_{11}(1, 2)$, $F_{11}(2, 1)$, $F_{11}(2, 2)$ – передаточна функція об'єкту по каналу $Sh - V$, $T - V$, $Sh - w$, $T - w$ відповідно.

В такому разі задача побудови математичної моделі зерносушарки розглядаємого класу полягає у тому, щоб за відомими спектральними щільностями вимірних сигналів S_{shsh} , S_{TT} , S_{VV} , S_w і їх взаємними спектральними щільностями S_{shV} , S_{shw} , S_{TW} , S_{VW} визначити структуру і параметри матриці передаточних функцій F_{11} в реальних експлуатаційних умовах, а також знайти закон зміни їх параметрів від координати Δ .

Так як реалізації вхідних і вихідних сигналів ЗСУ являють собою стаціонарні ергодичні випадкові процеси [4], то для визначення потрібних математичних моделей застосуємо спектральний метод структурної ідентифікації [3].

Згідно обраного алгоритму, шукана оптимальна матриця оцінок визначається з виразу

$$F = (F_{11}, F_{12}) = R_0^{-1} (T_0 + T_+) D^{-1}, \quad (3)$$

де R_0 – результат факторизації [5] вагового коефіцієнта (для ЗСУ $R_0 = E_2$);

D – результат факторизації блочної матриці S_{yy}

$$S'_{yy} = D \cdot D_* = \begin{bmatrix} S'_{uu} & 0_2 \\ 0_2 & E_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

в якій S_{uu} – матриця спектральних щільностей вхідних сигналів

$$S_{uu} = \begin{bmatrix} S_{shsh} & 0 \\ 0 & S_{TT} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

E_2 – одинична матриця розміром $[2 \times 2]$;

0_2 – нульова матриця розміром $[2 \times 2]$;

$(T_0 + T_+)$ – стійка частина результату сепарації [6] матриці S'_{yy} така, що

$$T = T_0 + T_+ + T_- = R_0 \cdot S'_{yx} \cdot D_*^{-1}, \quad (6)$$

' – знак транспонування;

* – знак Ермітового спряження [7];

S_{yx} – матриця вигляду

$$S'_{yx} = (S'_{ux}, S'_{\Delta x}), \quad (7)$$

де $S_{\Delta x}$ – результат факторизації рівняння зв'язку

$$S_{x\Delta} \cdot S_{\Delta\Delta}^{-1} \cdot S_{\Delta x} = S_{xx} - S_{xu} \cdot S_{uu}^{-1} \cdot S_{ux}, \quad (8)$$

S_{xx} – матриця спектральних щільностей вихідних сигналів

$$S_{xx} = \begin{bmatrix} S_v & S_{vw} \\ S_{wv} & S_w \end{bmatrix}, \quad (9)$$

S_{ux} – матриця виду

$$S_{ux} = \begin{bmatrix} S_{shv} & S_{shw} \\ 0 & S_{TW} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Після поетапного виконання алгоритму (3)-(10), були визначені матриці передаточних функцій F_{1l} для кожного з каскадів. Порівняльний аналіз даних матриць дозволив визначити, що всі вони мають загально виражену структуру:

$$F_{11} = \begin{bmatrix} F_{11}(1, 1) & 0 \\ F_{11}(2, 1) & F_{11}(2, 2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1(\Delta) \cdot (s + w_1(\Delta))}{s + w_2(\Delta)} e^{-s \cdot \tau_{shV}(\Delta)} & 0 \\ \frac{\alpha_2(s - \varphi)}{s + p_2} e^{-s \cdot \tau_{shw}} & \frac{\alpha_3(s + \varphi)}{s + p_2} e^{-s \cdot \tau_{Tw}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

тут τ_{shV} , τ_{shw} , τ_{Tw} – запізнення по каналу $Sh - V$, $Sh - w$, $T - w$ відповідно. Значення знайдених параметрів по кожному з каскадів зведені в табл. 1

З таблиці 1 видно, що елементи $F_{11}(2, 1)$, $F_{11}(2, 2)$ і $F_{11}(1, 2)$ не змінюють своїх коефіцієнтів по-каскадно, на відміну від $F_{11}(1, 1)$. Сталість параметрів пояснюється тим, що і температура агента, і вологість матеріалу вимірювались лише в одній точці і не по-каскадно. А наявність ланки I-порядку в чисельнику і знаменнику їхніх передаточних функцій ґрунтується на тому, що дана конструкція призначена для сушки вологого матеріалу, тому і володіє здатністю акумулювати в собі теплову енергію, в результаті чого відбувається випаровування надлишкової вологи спочатку з зовнішніх, а потім з внутрішніх шарів насіння.

Мінливість параметрів елемента $F_{11}(1, 1)$ характеризує зв'язок висоти шару зернового матеріалу зі зміною положення шибєру. Виконавши їх апроксимацію, наведену на рис 3, отримані наступні аналітичні вирази, що описують залежності $\alpha_1 = f(\Delta)$, $w_1 = f(\Delta)$, $w_2 = f(\Delta)$, $\tau_{shV} = f(\Delta)$ з 95% довірчою границею

$$\alpha_1(\Delta) = 0,7107 \cdot e^{-0,04036 \cdot \Delta} + 0,6863 \cdot e^{-0,003224 \cdot \Delta}, \quad (12)$$

$$w_1(\Delta) = 0,4482 \cdot e^{-0,147 \cdot \Delta} + 0,1037 \cdot e^{-0,002148 \cdot \Delta}, \quad (13)$$

$$w_2(\Delta) = 0,06535 \cdot e^{-0,1396 \cdot \Delta} + 0,01232 \cdot e^{-0,007514 \cdot \Delta}, \quad (14)$$

$$\tau_{shV}(\Delta) = 33,25 \cdot \Delta + 111,4. \quad (15)$$

Таблиця 1 – Параметри елементів матриці F_{11}

Каскад	α_1	α_2	α_3	$w_1, \frac{1}{c}$	$w_2, \frac{1}{c}$	$\varphi, \frac{1}{c}$	$p_2, \frac{1}{c}$	τ_{shV}, c	τ_{shw}, c	τ_{Tw}, c	Δ, cm
№1	1.0389	0.64413	0.17955	0.15	0.022	0.07	0.01	2.70	2.25	14.55	15
№2	0.83932	0.64413	0.17955	0.1	0.015	0.07	0.01	7.20	2.25	14.55	30
№3	0.7166	0.64413	0.17955	0.1	0.018	0.07	0.01	10.35	2.25	14.55	45
№4	0.62788	0.64413	0.17955	0.09	0.02	0.07	0.01	9.75	2.25	14.55	60
№5	0.55393	0.64413	0.17955	0.085	0.022	0.07	0.01	35.55	2.25	14.55	75
№6	0.53007	0.64413	0.17955	0.08	0.025	0.07	0.01	36.75	2.25	14.55	90
№7	0.51373	0.64413	0.17955	0.09	0.026	0.07	0.01	30.90	2.25	14.55	105

Те, що елемент $F_{11}(1, 1)$ має в своєму складі аперіодичну та форсуючу ланки пояснюється інерційністю реагування, яка виникає з властивості каскаду накопичувати зернову масу до деякого значення V (так як кут нахилу решета невеликий і складає 5-10°), розподілити її по всій площі каскаду, а потім, під дією сили гідравлічного опору киплячого шару, переміщувати її з каскаду на каскад. Зміна частоти $w_1(\Delta)$ за законом (15) пояснює те, що на швидкість зміни положення регулюючого органу відразу ж реагує перший каскад, а на решту каскадів – через деякий час по мірі надходження зерна з першого каскаду, ця швидкість впливає поступово і, практично, однаково. Частота $w_2(\Delta)$ характеризує інтенсивність киплячого шару. На нижньому каскаді, біля вентилятора, киплячий шар найінтенсивніший, далі – сила його спадає за законом (14).

Коефіцієнт α_1 змінюється згідно виразу $\alpha_1(\Delta) = 0,7107e^{-0,04036\Delta} + 0,6863e^{-0,003224 \cdot \Delta}$, адже максимальний вплив регулюючого органу (шибєру) на висоту зерна спостерігається саме на першому каскаді (перша точка на графіку), а вже потім, як видно, на інші послідовні решета вплив його спадає за експонентою.

Величина τ_{shV} елемента $F_{11}(1, 1)$ являє собою транспортне запізнення, і так як геометричні розміри 7-ми каскадів-решет ідентичні, то закон зміни описується лінійною функцією (15).

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

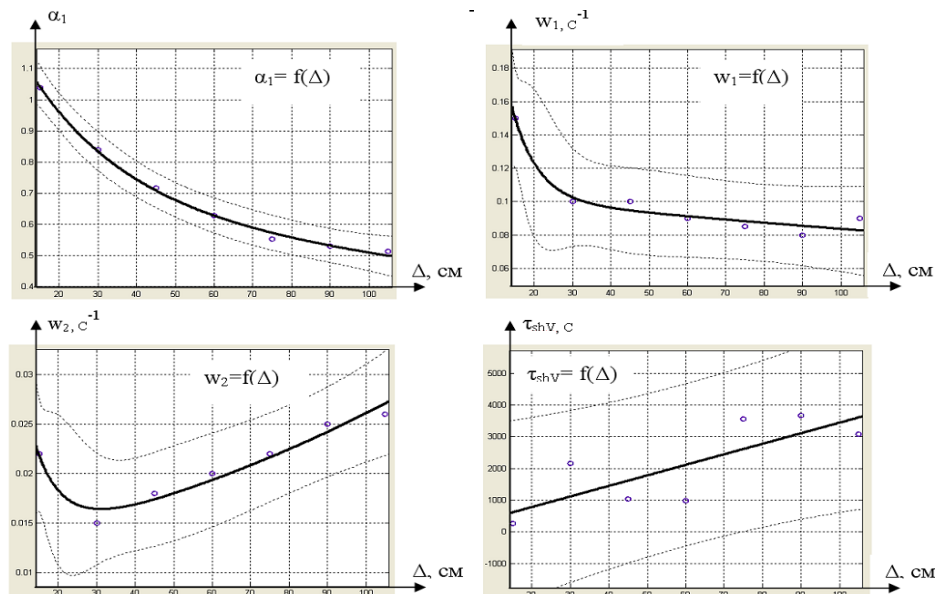


Рисунок 3 – Апроксимація змінних параметрів елемента $F_{11}(1, 1)$

На основі проведеного експерименту і обробки отриманих даних в цій статті був вперше застосований спектральний метод структурної ідентифікації для виключно нового на сьогоднішній день не ідентифікованого об'єкту – зерносушильної установки з киплячим шаром. Аналіз показав, що така ЗСУ може бути віднесена до класу складних взаємопов'язаних динамічних систем зі змінними параметрами із запізненням. В результаті застосування обраної методики ідентифікації знайдено матриці передаточних функцій об'єкта, зерносушильної установки з киплячим шаром, в реальних експлуатаційних умовах, а також закон зміни їх параметрів від координати Δ , саме це і стане основою для подальшого етапу роботи – синтезу САУ технологічним процесом сушки в ЗСУ.

Список літератури

1. С.І. Осадчий, М.О. Скриннік, І.О. Скриннік Зерносушильна установка з киплячим шаром як об'єкт автоматизації //Збірник наукових праць КНТУ/ Вип..17.– Кіровоград: КНТУ, 2006.– 388 с.
2. Гуляев Г.А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна – М.: Агропромиздат, 1990. – 357 с.
3. Блохін Л.М. Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління. – К.: Видавництво НАУ, 2003. – 209 с.
4. С.І. Осадчий, М.О. Скриннік, І.О. Скриннік Ідентифікація сигналів зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах //Вісник Хмельницького національного університету – 2007.–№3, т. 1.–С. 38-41.
5. М.С. Davis, Factoring the spectral matrix, IEEE Trans. Automat. Control 8 (1963).
6. Алиев Ф.А., Науменко К.И., Ларин В.Б., Сунцев В.Н. Оптимизация линейных инвариантных во времени систем управления. – К.: Наукова думка, 1978. – 309 с.
7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1988. – 552 с.

В данной статье впервые выведены матрицы передаточных функций объекта управления – зерносушильной установки с кипящим слоем в реальных эксплуатационных условиях, а также определен закон изменения их параметров от координаты, которая характеризует место расположения каскада.

In this article the matrices of transmission functions of management object are first shown out are options with a boiling layer in the real operating terms, and also the law of change of their parameters is certain from a co-ordinate which characterizes the place of location of cascade.