

М.О. Федотова, І.О. Скриннік С.І. Осадчий, Д.В. Трушаков

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ СИГНАЛІВ ЯК ОДИН З ЕТАПІВ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ  
АВТОМАТИЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ  
ВИСОТИ КИПЛЯЧОГО ШАРУ В ЗЕРНОСУШАРЦІ**

*Анотація. В роботі подано в широкому розумінні проблематику синтезу системи автоматичної стабілізації висоти киплячого шару, розкрито її значущість для покращення ефективності сушіння та показано застосування технології ідентифікації сигналів зерносушарки з урахування її особливостей, а саме багатовимірності та розподіленості.*

*Ключові слова: Киплячий шар, зерносушарка, каскади, теплоносій, спектральна щільність вхідного і вихідного сигналу, випереджував Сміта, система стабілізації.*

**Постановка проблеми.** Киплячий шар використовується у багатьох галузях виробництва, зокрема в АПК для сушіння зернових. В установках, в основі яких покладено принцип «киплячості», процес сушіння відбувається у багато разів швидше, ніж у звичайних зерносушарках. Це пояснюється тим, що у зваженому стані дисперсний матеріал омивається теплоносієм зі всіх сторін, що в значній мірі прискорює процес віддачі вологи у вигляді пари, тобто збільшується швидкість сушіння при мінімальній експозиції.

Якісно управляти швидкоплинними процесами можливо тільки при наявності автоматичних систем, розробка яких для такого роду об'єктів представляє деякі труднощі, і ось чому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При Центрально-українському національному технічному університеті на кафедрі сільськогосподарського машино-будування була розроблена конструкція зерносушарки з киплячим шаром (рис 1). Її особливістю є те, що в камері сушіння під кутом до вісі знаходяться 7 рівновіддалених на величину  $\Delta$  каскадів-решет, якими рухається зерно, нагадуючи собою в'язку «киплячу» речовину. Під нижній каскад подається агент сушіння з певною температурою. Частина вже зволоженого теплоносія виводиться через осадову камеру, а решта – через бункер завантаження. Наявність рівновіддалених каскадів викликає потребу розглядати суша-

рку як об'єкт автоматизації не лише із запізненнями за рахунок транспортування, а й як об'єкт з розподіленими параметрами.

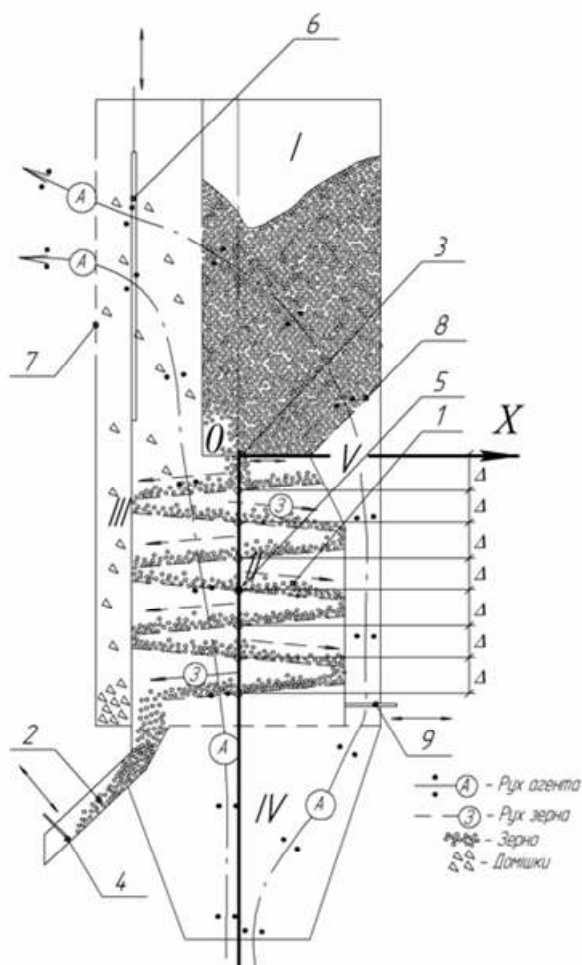


Рисунок 1 - ЗКШ з системою координат

Однією з головних причин зменшення ефективності сушіння насіння у таких зерносушарках є наявність суттєвих коливань висоти киплячого шару  $h$  та, як наслідок, флуктуацій кількості насіння у зоні сушіння.

Для зменшення впливу цієї причини на ефективність сушіння пропонується мінімізувати дисперсію відхилень висоти киплячого шару насіння від заданого значення у результаті постановки та розв'язання задачі синтезу оптимальної системи стабілізації такої висоти.

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 розробки в якійсь степені мають свої переваги та недоліки, але конкретно для зерносушарки, зобра-

женої на рис. 1, необхідно розробити власну систему стабілізації висоти киплячого шару з урахування її особливостей.

**Мета дослідження:** необхідно дослідити об'єкт з точки зору фізики процесу, проаналізувати зв'язки між сигналами «вхід-вихід» їх вплив між собою та визначити за відомою методикою опис експериментально знятих кривих сигналів у вигляді спектральних та взаємно спектральних щільностей.

**Основний текст статті:** Недоліки системи автоматичної стабілізації висоти киплячого шару пов'язані зі складністю зерносушарки як багатовимірного об'єкта керування з розподіленими параметрами та чистим запізненням, який функціонує в умовах неідеального виміру регульованих величин та дії багатовимірних випадкових збурень.

Якщо виконати декомпозицію зерносушарки, то можна представити її у вигляді множини багатовимірних об'єктів з чистим запізненням. Розмір цієї множини визначається кількістю каскадів, а динамічні характеристики її елементів залежать від відстані каскаду до шиберу  $\Delta$ . Тобто 7. Тоді зерносушарка з киплячим шаром (рис 1) при аналізі його вхідних і вихідних сигналів представляється узагальненою структурою так, як показано це на рисунку 2.

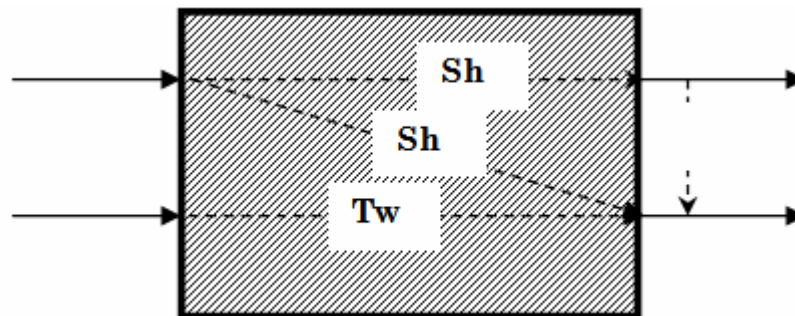


Рисунок 2 – Схема зв'язків вхідних і вихідних сигналів ЗОШ як об'єкта автоматизації

Тоді основними параметрами зерносушарки є:  $sh$  - зміна положення шиберу, що регулює подачу зерна безпосередньо в камеру сушіння,  $V$  - висота шару матеріалу на каскадах,  $\omega$  - кінцева вологість зернового матеріалу,  $T$  - температура теплоносія (агента).

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

ву вологість зерна  $\omega$ . Щодо температури агента  $T$ , то вплив її спостерігається лише на зміну кінцевої вологості і, аж ніяк, не на зміну висоти матеріалу на каскадах [2].

Для того, щоб описати сигнали «вхід-вихід» у вигляді спектральних щільностей, скористаємось алгоритмом Блекмена-Т'юки і сформуємо технологію визначення таких спектральних щільностей у розрізі кожного об'єкта [3]

1. Пронумеруємо каскади ЗКШ (рис 1.2) зверху вниз номерами №1...№7 відповідно.

2. Зафіксуємо експериментальні графіки сигналів «вхід-вихід»  $S_h(t) = (S_{h_1}, \dots, S_{h_n})$ ,  $T(t) = (T_1, \dots, T_n)$  та вихідних  $h_k(t) = (h_{k_1}, \dots, h_{k_n})$ ,  $w(t) = (w_1, \dots, w_n)$  сигналів по-каскадно, з урахуванням того, що  $S_{h_i} = S_h(i\Delta t)$ ,  $T_i = T(i\Delta t)$ ,  $h_i = h(i\Delta t)$ ,  $w_i = w(i\Delta t)$ ,  $k = 1, \dots, 7$  (каскади),  $i = 0, \dots, n$  такої довжини, щоб найбільша низькочастотна складова мала 5-10 періодів.

3. Визначити статистичні характеристики сигналів  $m_{S_h}$ ,  $m_T$ ,  $m_{h_k}$ ,  $m_w$  «вхід-вихід», застосовуючи функцію mean у пакеті MatLab [4], [5].

4. Визначити дисперсію сигналів  $D_{S_h}$ ,  $D_T$ ,  $D_{h_k}$ ,  $D_w$ , використовуючи вбудовану функцію var у пакеті MatLab, а також визначити квадрат значення відповідних дисперсій, що і є середньоквадратичним відхиленням функцій  $\sigma_x$  [4].

5. Заповнити таблицю у вигляді:

|          | Sh | T | h1 | ... | hk | w |
|----------|----|---|----|-----|----|---|
| M        |    |   |    |     |    |   |
| D        |    |   |    |     |    |   |
| $\sigma$ |    |   |    |     |    |   |

6. Відшукати 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  $R_{S_h h_k}$ ,  $R_{S_h w}$ ,  $R_{Tw}$ ,  $R_{wh_k}$  за допомогою функції xcov ППП MatLab [4].

7. Визначити 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 ЗКШ в результаті застосування підпрограми spectrplotn [4].

8. Перевірити фізичнореалізуємість отриманих математичних моделей сигналів «вхід-вихід» у вигляді СЩ та ВСЩ [6].

9. Апроксимувати графіки оцінок спектральних щільностей методом типових логарифмічних характеристик та отримати спрощені аналітичні вирази спектральних щільностей сигналів «вхід-вихід» зерносушарки з киплячим шаром [6].

10. Скласти матриці спектральних та взаємних спектральних щільностей сигналів.

**Результати.** В результаті застосування даної технології, побудованої на алгоритмі Блекмена-Т'юки до реалізацій компонентів векторів сигналів керування та вихідних сигналів (рис. 3) [1] отримані оцінки відповідних кореляційних функцій (рис. 4) [2] та спектральних щільностей (рис 5, синій колір графіку) 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 5 (зелений колір апроксимації).

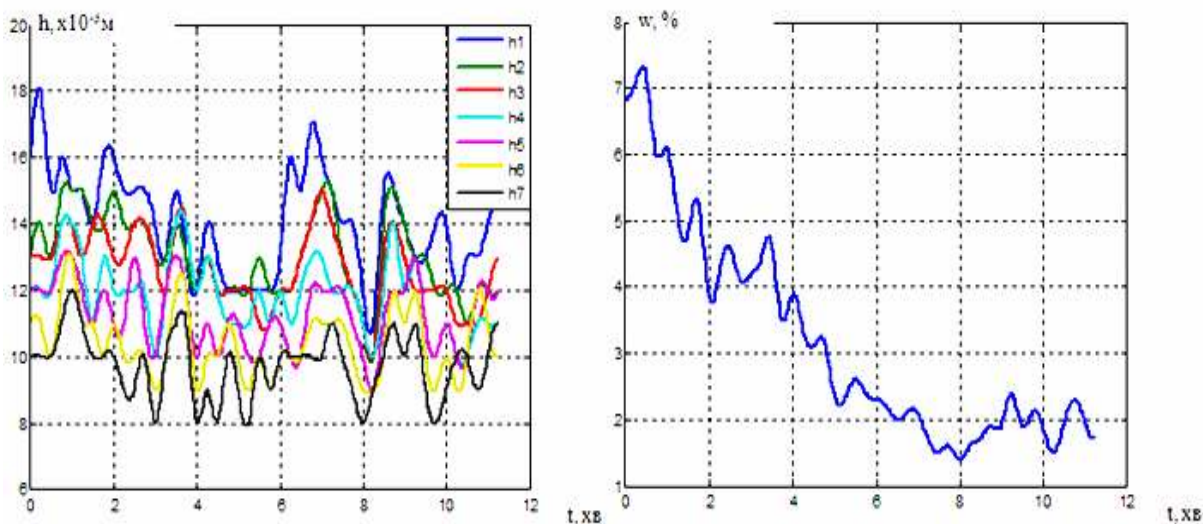


Рисунок 3 - Експериментально зняті графіки на прикладі вихідних сигналів зерносушарки ( $h$ -зміна висоти киплячого матеріалу по-каскадно №1-№7;  $w$ - зміна кінцевої вологості зерна на виході із сушарки)

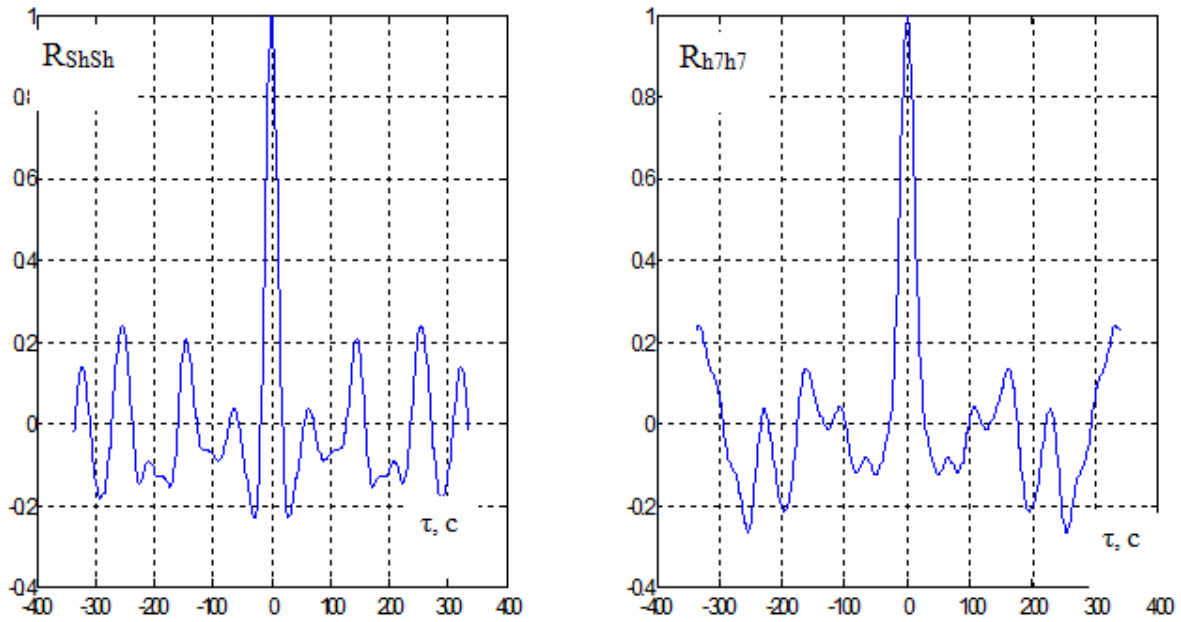


Рисунок 4 - Графіки автокореляційних функцій сигналів вхід-вихід (сьомий каскад)

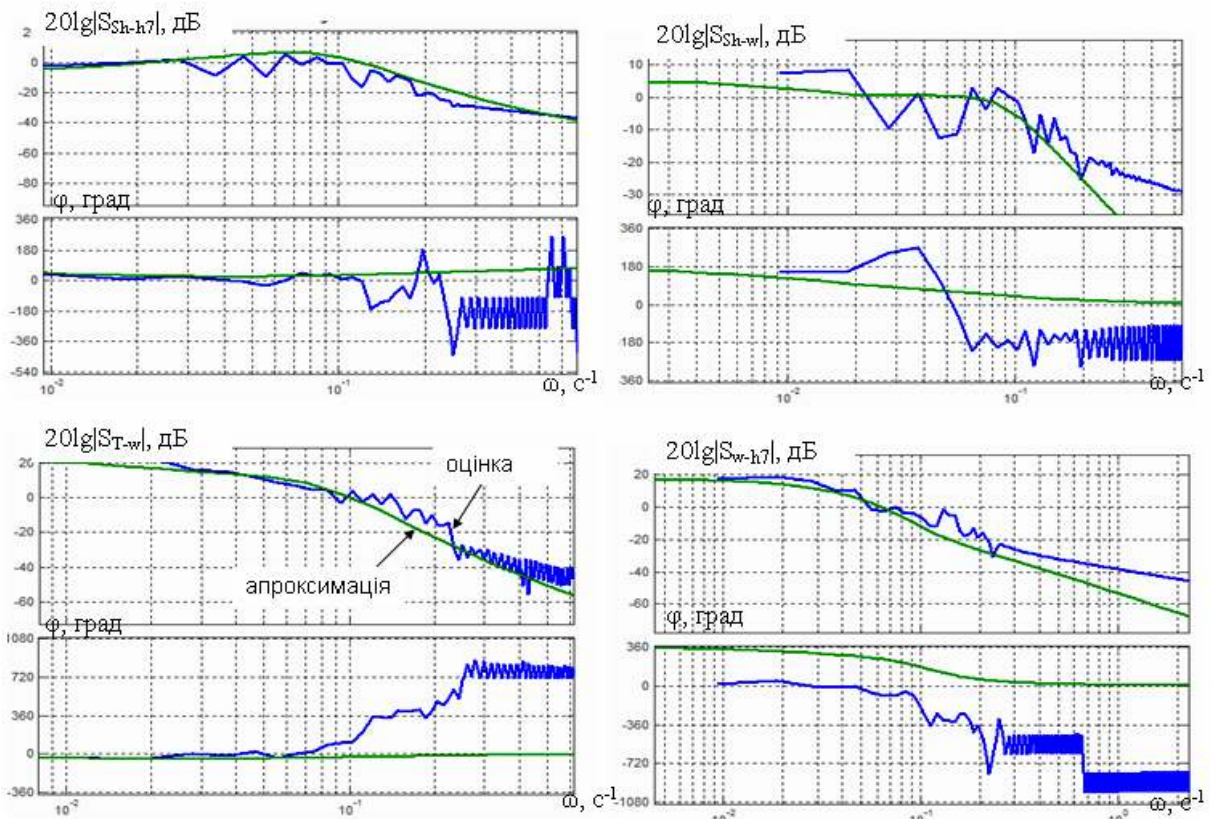


Рисунок 5 - Графіки апроксимованих спектральних щільностей сигналів

В результаті апроксимації методом узагальнених логарифмічних частотних характеристик були отримані вирази для спектральних щільностей сигналів (1)-(9):

$$S_{S_h S_h} = k_{S_h} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2, \quad (1)$$

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

$$S_{h_k h_k} = k_{h_k} \left| \frac{(s + c_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2, \quad (3)$$

$$S_{ww} = k_w \left| \frac{1}{(s + a_9)} \right|^2, \quad (4)$$

$$S_{S_h h_k} = k_{S_h h_k} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_5)}{(s + a_6)}, \quad (5)$$

$$S_{S_h w} = k_{S_h w} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_7)}{(s + a_8)}, \quad (6)$$

$$S_{T w} = k_{T w} \left| \frac{(s + a_3)(s + b_2)}{(s + b_3)(s^2 + 2d_1 b_4 s + b_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_7)}{(s + a_8)}, \quad (7)$$

$$S_{w h_k} = k_{w h_k} \left| \frac{(s + u_1)(s + u_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s^2 + 2d_2 a_4 s + a_4^2)(s^2 + 2d_3 b_5 s + b_5^2)}{(s + u_3)(s + u_4)}, \quad (8)$$

$$S_{h_n h_{n+1}} = k_{h_n h_{n+1}} \frac{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s^2 + 2d_4 p_4 s + p_4^2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \quad (n=1, 2, \dots, 6) \quad (9)$$

Порівняльний аналіз отриманих виразів показав, що однакову структуру мають вирази автоспектральних щільностей  $S_{S_h S_h}$ ,  $S_{TT}$ ,  $S_{h_k h_k}$ , на відмінну від  $S_{ww}$ . Також загальними виразами описуються і взаємно спектральні щіль-

ності  $S_{S_h h_k}$ ,  $S_{S_h w}$ ,  $S_{T_7 w}$ . Спектральні і взаємно спектральні щільності сигналів по-каскадно мають загально виражену для всіх семи каскадів структуру, коефіцієнти якої змінюються від місцеположення каскаду відносно завантажуючого шиберу. Дана особливість є характерною для ЗКШ як об'єкта керування з розподіленими параметрами.

**Висновки.** Отримані вирази є вихідними даними для виконання структурно-параметричної ідентифікації, в результаті якої будуть знайдені матриці передаточних функцій ЗКШ та збурень, що діють на неї в процесі сушіння по-каскадно.

#### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Петренко М.М. Експериментальні дослідження впливу параметрів зерносушарки каскадного типу на показники роботи / М. М. Петренко, І. О. Скриннік, Д. В. Богатирьов, М. О. Скриннік // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин (Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник). – 2006. – №36. – С. 29-34.
2. Осадчий С.І. Ідентифікація сигналів зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах / С. І. Осадчий, М. О. Скриннік, І. О. Скриннік // Вісник Хмельницького національного університету (Технічні науки). – 2007. – Т. 1. – С. 38-41
3. Методи сучасної теорії управління. Навч посібник / А.П. Ладанюк, В.Д. Кишенько, Н.М. Луцька, В.В. Івашук. – К.: НУХТ, 2010. – 196 с
4. Дьяконов В.П. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: Специальный справочник / В.П. Дьяконов, В.А. Круглов. – СПб: Питер, 2002. – 448 с.
5. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: В.школа, 2000. – 383 с.
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.

#### REFERENS

1. Petrenko M.M. Experimental studies of the influence of grain parameters of the cascade type on the performance indicators / M.M. Petrenko, I.O. Skrynnik, D.V.Bogatyrev, M.O. Skrynnik // Design, manufacture and operation of agricultural machinery (National Interdepartmental scientific and technical collection). - 2006. - №36. - P. 29-34.



2. Sedimentary S.I. Identification of signals of a grain dryer with a fluidized bed in real operating conditions / S.I. Osadchy, M.O. Skrynnik, I.O. Skrynnik // Visnyk of Khmelnytsky National University (Technical Sciences). - 2007. - V. 1. - P. 38-41
3. Methods of modern management theory. Textbook / A.P. Ladanyuk, V.D. Kishenko, N.M. Lutsk, V.V. Ivashuk. - К .: НУХТ, 2010. - 196 с
4. Dyakonov V.P. MATLAB. Analysis, identification and modeling of systems: Special reference book / VP Дьяконов, В.А. Круглов. - СПб: Питер, 2002. - 448 с.
5. Wentzel E.S. The theory of random processes and its engineering applications. - М .: V.shkola, 2000. - 383 p.
6. Azarskov V.N. Methodology of designing optimal systems of stochastic stabilization / V.N. Азарсков, Л.Н. Blokhin, L.S. Zhitetsky, - monograph. К .: NAU, 2006. - 438 p.

Received 01.04.2021.

Accepted 07.04.2021.

***Идентификация сигналов как один из этапов синтеза системы автоматической стабилизации высоты кипящего слоя в зерносушилке***

*В работе представлена в широком смысле проблематика синтеза системы автоматической стабилизации высоты кипящего слоя, раскрыто ее значение для повышения эффективности сушки и показано применение технологии идентификации сигналов зерносушилки с учетом ее особенностей, а именно многомерности и распределенности.*

***Identification of signals as one of the stages of synthesis of the system of automatic stabilization of the height of the fluidized bed in the grain dryer***

*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.*

*The study of the designs of fluidized bed grain dryers showed that they show irregular fluctuations in the height of the fluidized bed, and, accordingly, the efficiency of energy use for drying. The reason for this phenomenon is related, on the one hand, to random fluctuations in the amount of grain in the fluidized bed, and on the other - to the shortcomings of the system of automatic stabilization of its height.*

*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.*

*The degree of connections between input-output signals in the form of correlation and cross-correlation functions was studied, and the physical processes occurring in the grain dryer were analyzed. As a result of applying the Blackman-Tukey algorithm to the implementations of the components of the control signal vectors and output signals, estimates of the corresponding correlation functions and spectral densities for all elements of the set of control objects were obtained. The discrete Fourier transform of smoothed estimates of correlation and cross-correlation functions allowed us to calculate estimates of the spectral and mutual spectral densities of the respective signals. Approximation of spectral and mutual spectral density estimates by the method of generalized logarithmic frequency characteristics allowed to determine the mathematical description of these signals in the form of spectral density expressions, which will be the basis for the next stage of object identification.*

**Федотова Маріанна Олександрівна** – асистент, Центральноукраїнський національний технічний університет.

**Скриннік Іван Олександрович** – доцент,, Центральноукраїнський національний технічний університет.

**Осадчий Сергій Іванович** – професор, Центральноукраїнський національний технічний університет.

**Трушаков Дмитро Володимирович** – доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет.

**Федотова Марианна Александровна** – ассистент, Центральноукраинский национальный технический университет.

**Скрынник Иван Александрович** – доцент, Центральноукраинский национальный технический университет.

**Осадчий Сергей Иванович** – профессор, Центральноукраинский национальный технический университет.

**Трушаков Дмитрий Владимирович** – доцент, Центральноукраинский национальный технический университет.

**Fedotova Marianna** – assistant, Central Ukrainian National Technical University.

**Skrynnik Ivan** - associate professor, Central Ukrainian National Technical University.

**Osadchy Serhiy** – professor, Central Ukrainian National Technical University.

**Trushakov Dmitry** - associate professor, Central Ukrainian National Technical University.