

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ В КИПЛЯЧОМУ ШАРІ

Федотова М. О., Скриннік І. О., Дарієнко В. В.

### ВСТУП

Тривале та якісне зберігання насіння пов'язане з технологічною операцією з приведення його в стійкий стан. Необхідність сушіння насіннєвих культур викликана його підвищеною вологістю після збирання врожаю. До 80% врожаю всіх насіннєвих культур, що надходять на хлібоприймальні підприємства та токи господарств, мають підвищену вологість до 20 % під час збирання. У даний час проблемам підвищення ефективності технологічних процесів сушіння насіннєвих культур приділяється велика увага, особливо це актуально для малих фермерських господарств, де обробляють та сушать насіння невеликих об'ємів. На сьогоднішній день в господарствах України використовуються переважно застарілі зерносушарки і вони допрацьовують свій ресурс. Питаннями сушіння насіння та зерна займалися багато дослідників, серед яких: Лебедев, Ликов<sup>1</sup>, Забродський<sup>2</sup>, Гінзбург<sup>3</sup>, Баум<sup>4</sup>, Федоров, Резчиков<sup>5</sup>, Птіцин<sup>6</sup>, Котов. Проводячи аналіз результатів досліджень та вивчивши конструкції зерносушарок<sup>7</sup> на відповідність вимогам сушіння, 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

---

<sup>1</sup> Лыков А.В. Теория сушки. М: Энергия, 1968. 550 с.

<sup>2</sup> Забродский С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдоожиге (кипящем) слое. М: Госэнергоиздат, 1963. 488 с.

<sup>3</sup> Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1973. 528 с.

<sup>4</sup> Баум А.Е., Резчиков В.А. М.: Колос, 1983. 223 с.

<sup>5</sup> Резчиков В.А. Исследование процесса сушки зерна в кипящем слое: диссертация к.т.н. М, 1962. 156 с.

<sup>6</sup> Птицын С.Д. Зерносушилки. М.: Машгиз, 1962. 179 с.

<sup>7</sup> Гершой А.П., Самочётов В.Ф. Зерносушение и зерносушилки. М.: Колос, 1967. 255 с.

є сушіння в киплячому шарі<sup>8</sup>, завдяки чому підвищується продуктивність зерносушарки та зменшуються енергетичні втрати.

На кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький) була розроблена експериментальна зерносушарка з киплячим шаром (ЗКШ) каскадного типу<sup>9</sup> (рис 1).

Досліди, проведені на новій моделі сушарки, показали, що така модель має ряд переваг<sup>10</sup>, а саме:

1. процес теплообміну між теплоносієм і зерновою масою відбувається інтенсивніше за рахунок збільшення геометричної площі дотику між агентом і матеріалом;

2. нагрів зерна по всьому об'єму рівномірний, що дуже важливо для сушки термолабільних продуктів;

3. можливість обробки сирого, неочищеного зерна, що, практично, може замінити один з етапів поточної лінії – сепарацію;

4. простота і компактність конструкції надає можливість використовувати її мобільно;

5. створюються сприятливі умови для автоматизації (контроль, регулювання, управління)<sup>11</sup>.

Процес сушіння в такій ЗКШ 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, збільшуватись в об'ємі і рухатись з верхнього каскаду на каскад нижній (№1), нагадуючи собою в'язку речовину.

---

<sup>8</sup> Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. М.: Агропромиздат, 1968. 355 с.

<sup>9</sup> Пат. UA 10346 U Україна №и 200503610 Зерносушильна установка касетного типу: деклараційний патент UA 10346 U Україна. Петренко М.М., Скриннік І.О., заявник та власник патенту – Кіровоградський національний технічний університет; заяв. 18.04.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11. 4 с.

<sup>10</sup> Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В., Скриннік М.О.. Експериментальні дослідження впливу параметрів зерносушарки каскадного типу на показники роботи (Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин). Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград, 2006. № 36. С. 29-34.

<sup>11</sup> Куцакова В.Е., Богатырёв А.И. Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1987. 236 с.



**Рис. 1. Зерносушарка з киплячим шаром каскадного типу  
(експериментальна модель)**

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 диференційних 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<sup>12</sup>, які стали основою для застосування розробленої заздалегідь методики ідентифікації

---

<sup>12</sup> Осадчий, С. І., Скриннік М.О, Скриннік І.О. Зерносушильна установка з киплячим шаром для сушки зернових як об'єкт автоматизації . *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету* (Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація). 2006. № 17. С. 61-65.

складного багатовимірного об'єкту з розподіленими параметрами із запізненням.

## 1. Отримання експериментальних даних

Проблема розробки системи автоматичного регулювання процесами в сушарці з киплячим шаром пов'язана з тим, що така сушарка належить до багатовимірного об'єкта керування з розподіленими параметрами та чистим запізненням, який функціонує в умовах неідеального виміру регульованих величин та дії багатовимірних випадкових збурень.

Задача ідентифікація сигналів ЗКШ каскадного типу полягає в тому, щоб за даними про зміну сигналів  $S_h$ ,  $T$ ,  $h_k$ , та  $w$  на кожному з каскадів ЗКШ (рис. 2) отримати аналітичні вирази числових характеристик зазначених випадкових процесів, а також оцінити взаємозв'язки між ними.

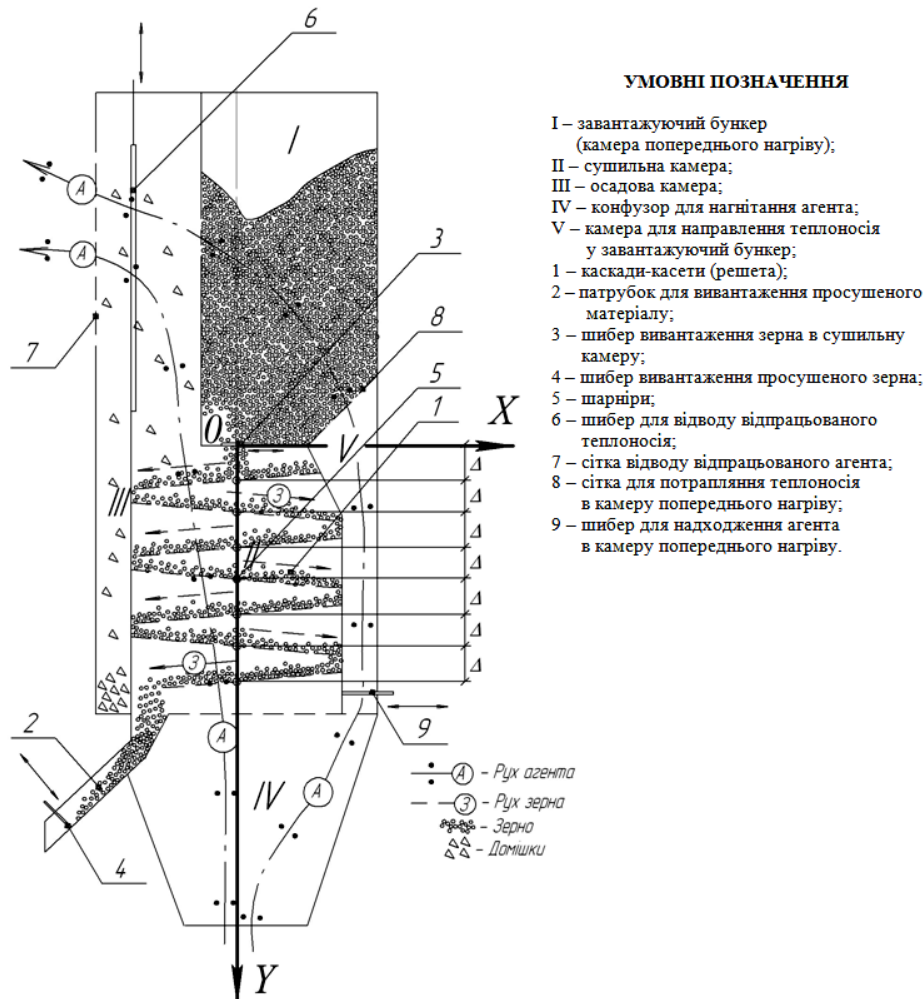
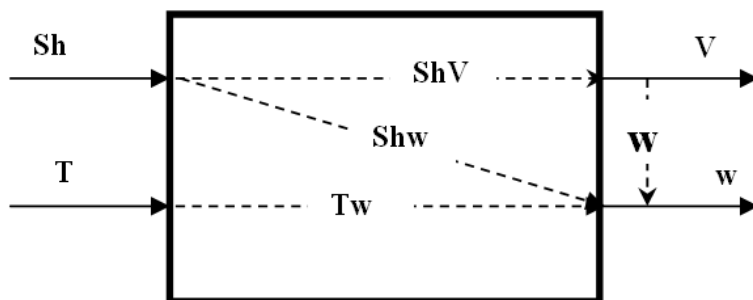


Рис. 2. Конструкція сушарки сипучих матеріалів (схема, розріз)

Якщо виконати декомпозицію зерносушарки, то можна представити її у вигляді множини багатовимірних об'єктів з чистим запізненням<sup>13</sup>. Розмір цієї множини визначається кількістю каскадів, а динамічні характеристики її елементів залежать від відстані каскаду до шибєру  $\Delta$ . Тобто 7. Тоді зерносушарка з киплячим шаром (рис. 1) при аналізі його вхідних і вихідних сигналів представляється узагальненою структурою так, як показано це на рис. 3.



**Рис. 3. Схема зв'язків вхідних і вихідних сигналів ЗКШ як об'єкта автоматизації**

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

З метою отримання множин експериментальних даних про зміну сигналів об'єкта (рис. 3.1) була проведена серія дослідів<sup>14</sup> на соняшниковому насінні<sup>15</sup>, шар якого розміщувався на решітках (каскадах), крізь який пропускали теплоносії, математичне сподівання температури якого **T** дорівнювало 100...130°C, а математичне сподівання швидкості складало до 1,5 м/с.

Отримані множини по-каскадно показані на рис. 4, де

<sup>13</sup> Осадчий, С.І., Калита М.О., Скринік І.О., Рева О.М. Ідентифікація динаміки зерносушильної установки з киплячим шаром як об'єкта автоматизації. Доклади XV Міжнародної конференції по автоматическому управленію «Автоматика-2008» (м. Одеса, 22-26 вересня 2008 р). Одеса: ОНМА, 2008. Т. 2. С. 877-879.

<sup>14</sup> Володарский Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента. К. : В. школа, 1987. 279 с.

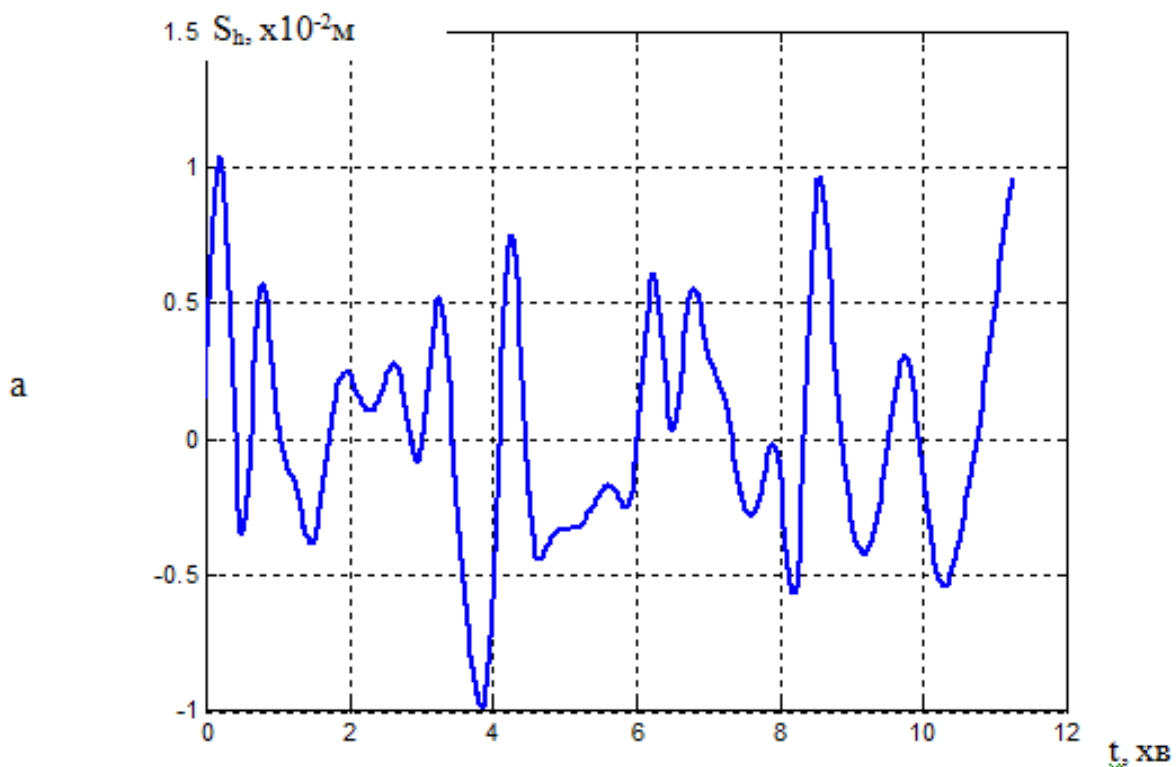
<sup>15</sup> Осадчий, С. І., Скриннік М.О., Скриннік І.О. Ідентифікація сигналів зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах. *Вісник Хмельницького національного університету* (Технічні науки). 2007. Т. 1. С. 38-41.

а) графік зміни положення шибери  $Sh$ ; б) графік зміни температури теплоносія під сьомим каскадом  $T$  (найнижчій); в) зміна висоти киплячого шару на каскадах  $h_k$  (№ 1 (верхній) – № 7 (нижній)); г) графік зміни кінцевої вологості насіння соняшника  $w$ .

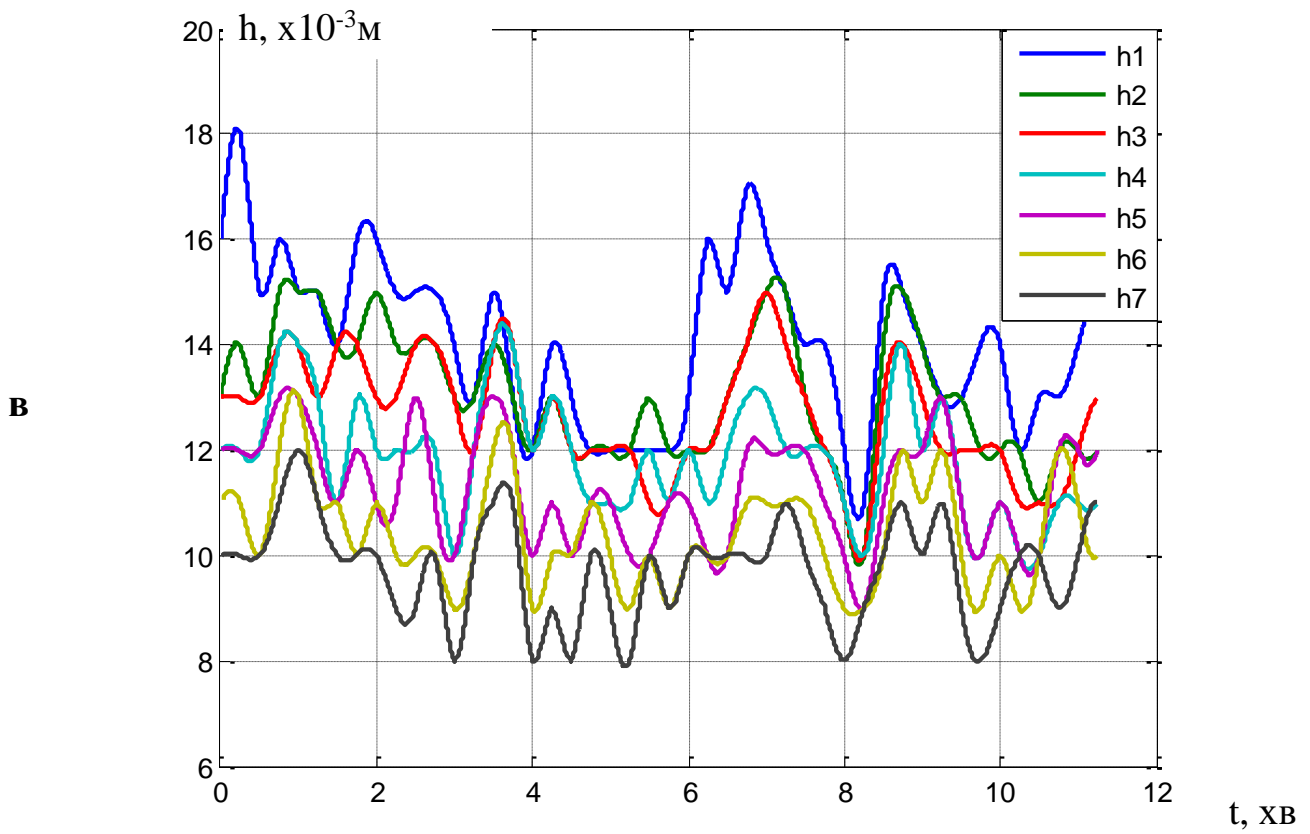
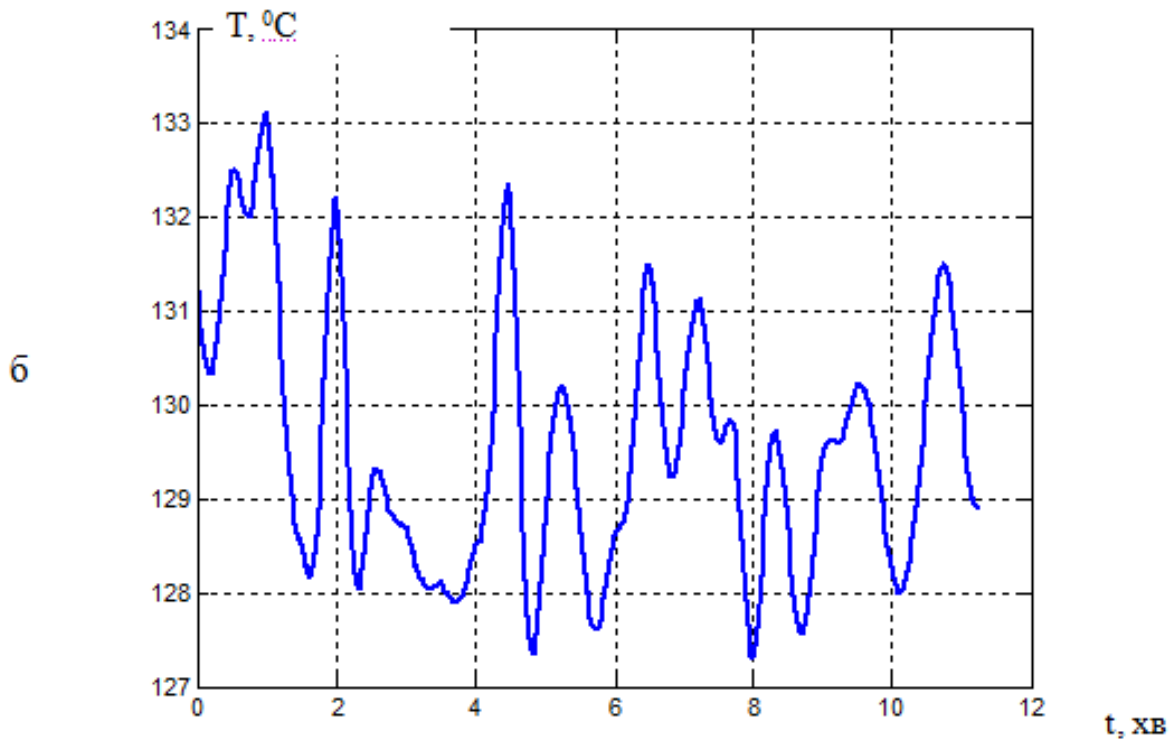
Тоді ідентифікація сушарки як об'єкта автоматизації буде складатись з двох етапів<sup>16</sup>:

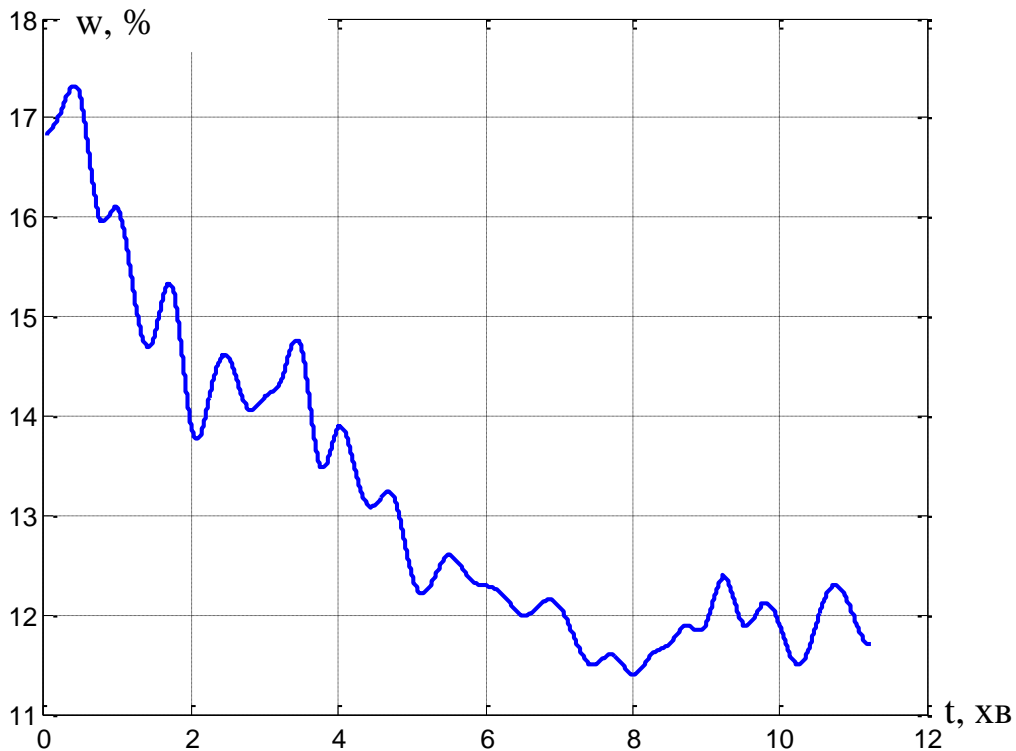
1. Ідентифікація сигналів у вигляді спектральних і взаємно-спектральних щільностей (ВСЩ)

2. Визначення матриці передаточних функцій (МПФ) сушарки в розрізі розподіленості параметрів



<sup>16</sup> Осадчий С. І., Калита М.О., Скринник І.О. Визначення структури і параметрів математичної моделі зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах. *Вісник Харківського технічного університету сільського господарства* (Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження у АПК України). 2008. Т. 2, № 73. С. 156-158.





**Рис. 4. Графіки експериментальних кривих**

## **2. Методика ідентифікації сигналів вхід-вихід сушарки та практичне її застосування**

Для того, щоб описати сигнали «вхід-вихід» у вигляді спектральних щільностей, скористаємось алгоритмом Блекмена-Т'юки<sup>17</sup> і сформуємо технологію визначення спектральних щільностей (СЩ) у розрізі кожного об'єкта.

1. Пронумеруємо каскади ЗКШ (рис. 2) зверху вниз номерами № 1...№ 7 відповідно.

2. Зафіксуємо експериментальні графіки сигналів «вхід-вихід»  $S_h(t) = (S_{h1}, \dots, S_{hn})$ ,  $T(t) = (T_1, \dots, T_n)$  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.

<sup>17</sup> Отнес Р. Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М. : Мир, 1982. 482 с.



3. Визначити статистичні характеристики сигналів  $m_{S_h}$ ,  $m_T$ ,  $m_{h_k}$ ,  $m_w$  «вхід-вихід», застосовуючи функцію *mean*<sup>18</sup> у пакеті MatLab.

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  $\sigma_x$ .

5. Заповнити таблицю у вигляді:

	<b>S<sub>h</sub></b>	<b>T</b>	<b>h<sub>1</sub></b>	<b>...</b>	<b>h<sub>k</sub></b>	<b>w</b>
<b>M</b>						
<b>D</b>						
<b>σ</b>						

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* ППМ MatLab.

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*.

8. Перевірити фізичнореалізуємість отриманих математичних моделей сигналів «вхід-вихід» у вигляді СЦ та ВСЦ.

9. Апроксимувати графіки оцінок спектральних щільностей методом типових логарифмічних характеристик та отримати спрощені аналітичні вирази спектральних щільностей сигналів «вхід-вихід» зерносушарки з киплячим шаром<sup>19</sup>.

10. Скласти матриці спектральних та взаємних спектральних щільностей сигналів.

Застосуємо вищеописану методику до отриманих раніше експериментальним шляхом масивів даних, а саме: знайдемо математичне сподівання **m**, дисперсія **D** та середньоквадратичне відхилення **σ** сигналів **S<sub>h</sub>**, **T**, **h<sub>k</sub>** та **w**, котрі зведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

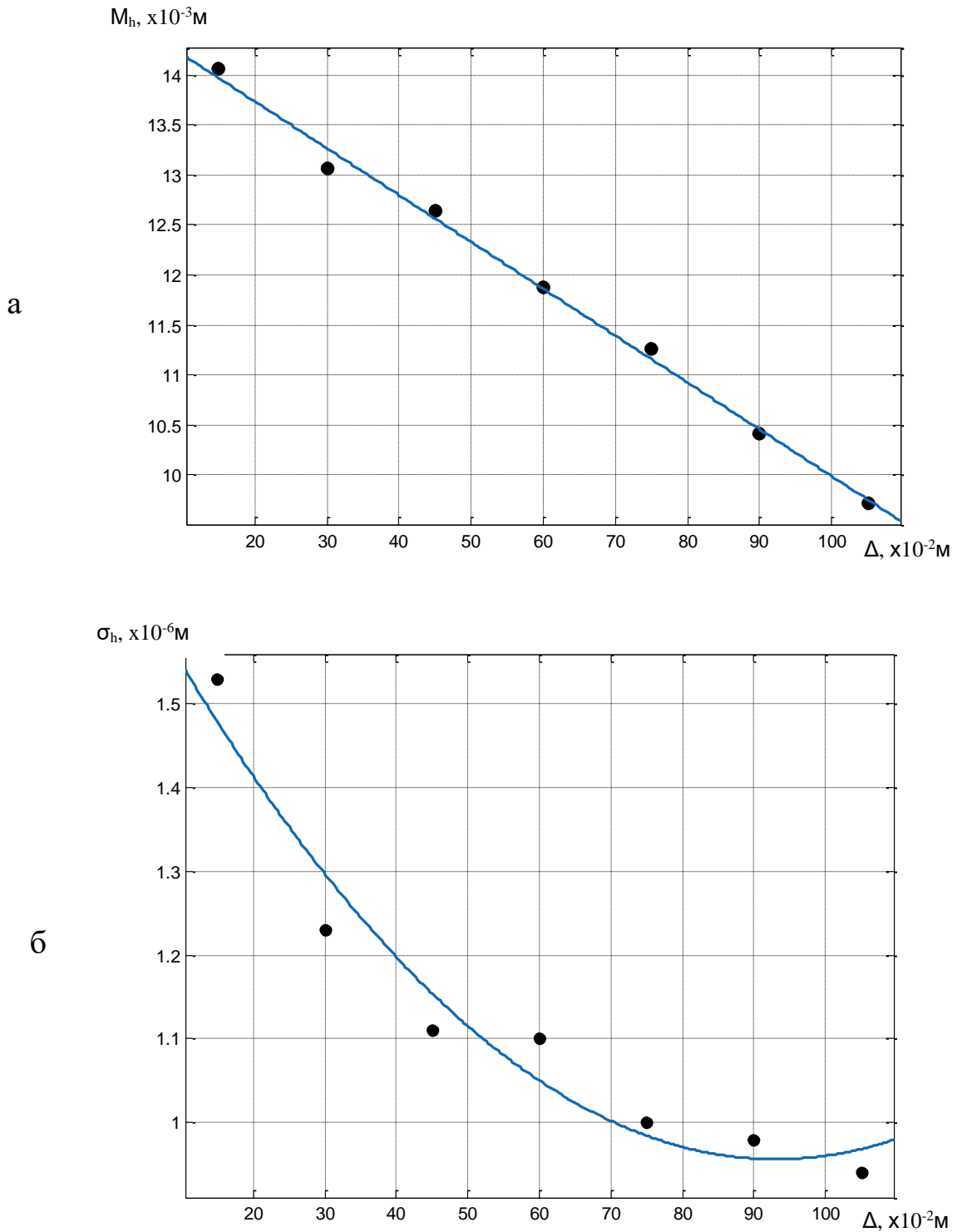
### Числові характеристики сигналів «вхід-вихід» ЗКШ

	<b>S<sub>h</sub></b> , $10^{-2}M$	<b>T</b> , °C	<b>h<sub>1</sub></b> , $10^{-3}M$	<b>h<sub>2</sub></b> , $10^{-3}M$	<b>h<sub>3</sub></b> , $10^{-3}M$	<b>h<sub>4</sub></b> , $10^{-3}M$	<b>h<sub>5</sub></b> , $10^{-3}M$	<b>h<sub>6</sub></b> , $10^{-3}M$	<b>h<sub>7</sub></b> , $10^{-3}M$	<b>w</b> , %
<b>m</b>	0.019	129.54	14.06	13.06	12.64	11.87	11.26	10.41	9.72	13.17
<b>D</b>	0.16	1.87	2.34	1.52	1.23	1.21	1.01	0.95	0.88	2.54
<b>σ</b>	0.40	1.37	1.53	1.23	1.11	1.10	1.00	0.98	0.94	1.60

<sup>18</sup> Дьяконов В.П., Круглов В.А. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: Специальный справочник. СПб: Питер, 2002. 448 с.

<sup>19</sup> Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. К.: Либідь, 2007. 656 с.

Графіки зміни математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення висоти киплячого шару в залежності від відстані каскаду до шибєру завантаження представлені на рис. 5.



**Рис. 5. Графіки**

- а) математичного сподівання висоти киплячого шару на каскадах;
- б) середньоквадратичного відхилення висоти киплячого шару на каскадах

Аналіз графіків рис. 5 дозволяє стверджувати, що математичне сподівання  $M_h$  висоти киплячого шару по-каскадно змінюється по лінійному закону, а от середньоквадратичне відхилення  $\sigma_h$  – за законом другого порядку.

Для визначення оцінок авто  $R_{S_h S_h}$ ,  $R_{TT}$ ,  $R_{h_k h_k}$ ,  $R_{ww}$  і взаємно  $R_{S_h h_k}$ ,  $R_{S_h w}$ ,  $R_{Tw}$ ,  $R_{wh_k}$  кореляційних функцій сигналів «вхід-вихід» зерносушарки використані вбудовані функції в ПП MatLab<sup>20</sup>. Для ілюстрування отриманих результатів приведені деякі графіки відшуканих нормованих оцінок кореляційних функцій.

В результаті визначення ступеню зв'язку між сигналами<sup>21</sup> (аналізуючи отримані графіки) виявилось, що значна кореляція спостерігається між сигналами<sup>22</sup>:  $S_h - h_k$ ,  $S_h - w$ ,  $T - w$ ,  $h_k - w$ . Такий зв'язок пояснюється фізикою процесу, адже зміна положення шиберу  $S_h$ , що регулює подачу зерна в камеру сушіння, впливає, перш за все, на висоту шару  $h_k$  матеріалу на каскадах, а, значить, і на кінцеву вологість зерна  $w$ . Щодо температури агента  $T$ , то вплив її спостерігається лише на зміну кінцевої вологості і, аж ніяк, не на зміну висоти матеріалу на каскадах  $h_k$ .

Запізнення по основним каналам керування були визначені в результаті застосування кореляційного методу. Для сьомого каскаду запізнення по каналу  $S_h - h$ ,  $S_h - w$ ,  $T - w$  мають наступні числові значення:

$$\begin{aligned} \tau_{S_h h} &= 30,9c, \quad \tau_{S_h w} = 208,8c, \\ \tau_{Tw} &= 15,3c, \quad \tau_{hw} = 12,75c. \end{aligned}$$

Характерно, що запізнення в каналах  $S_h - w$ ,  $T - w$  по всім семи каскадам однакові, а от по каналу  $S_h - h$  змінюється в залежності від розташування каскаду відносно завантажуючого шиберу, тобто від координати  $\Delta$ . Відшукані числові значення запізньень по каналу керування  $S_h - h$  по-каскадно наступні:

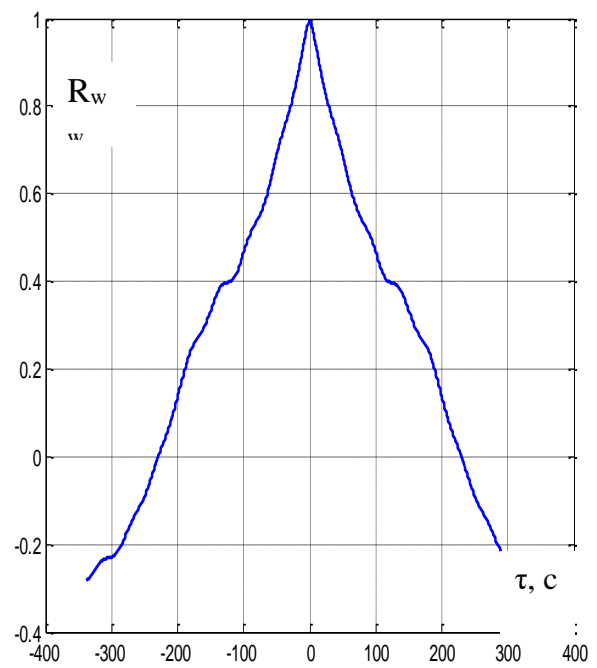
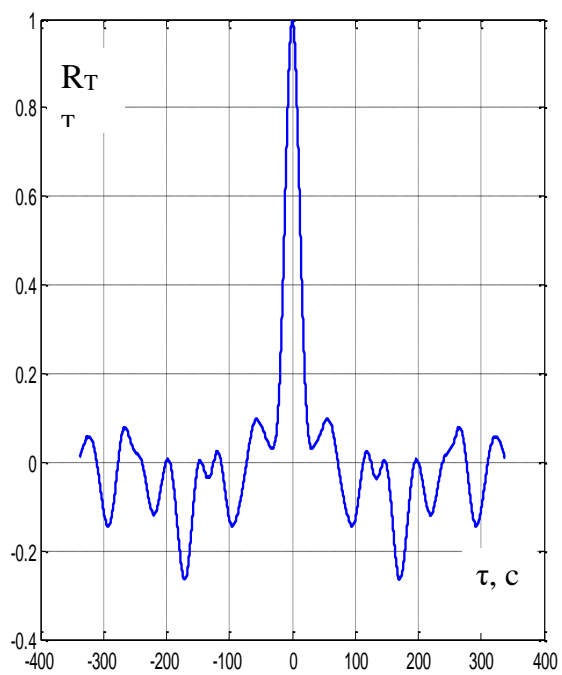
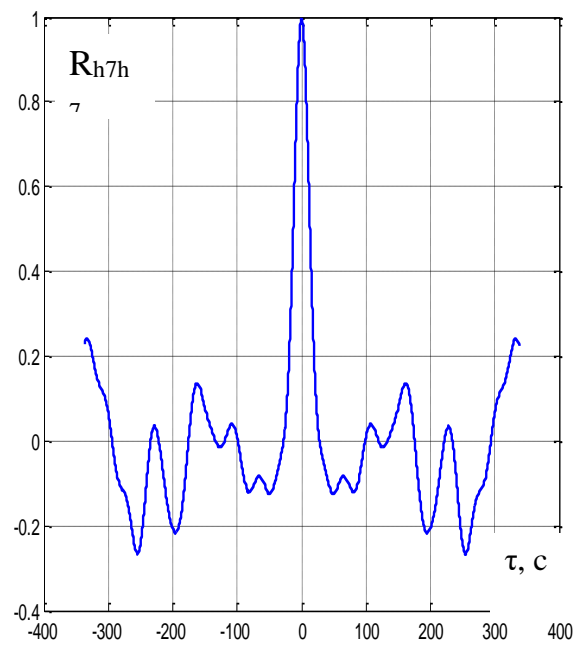
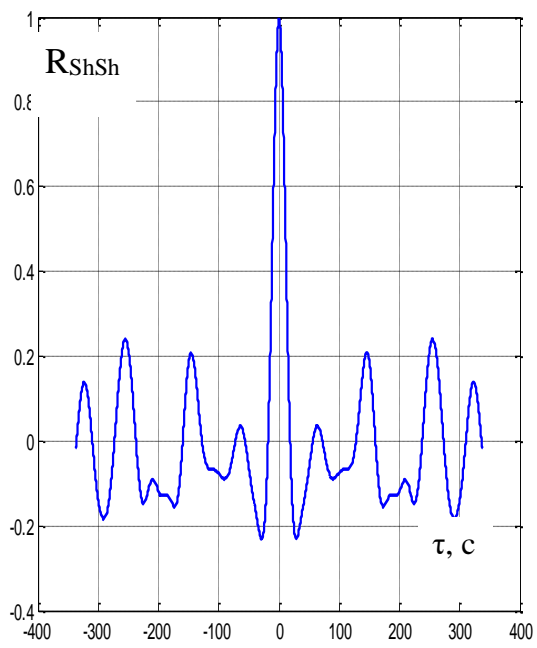
$$\begin{aligned} \tau_{S_h h}(1) &= 2,7c; \quad \tau_{S_h h}(2) = 7,2c; \\ \tau_{S_h h}(3) &= 10,35c; \quad \tau_{S_h h}(4) = 14,25c; \\ \tau_{S_h h}(5) &= 20,55c; \quad \tau_{S_h h}(6) = 29,25c; \\ \tau_{S_h h}(7) &= 30,9c \end{aligned}$$

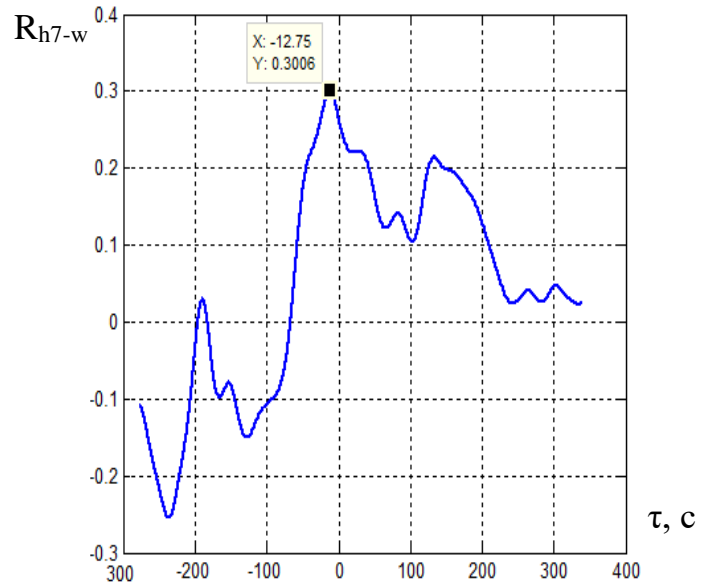
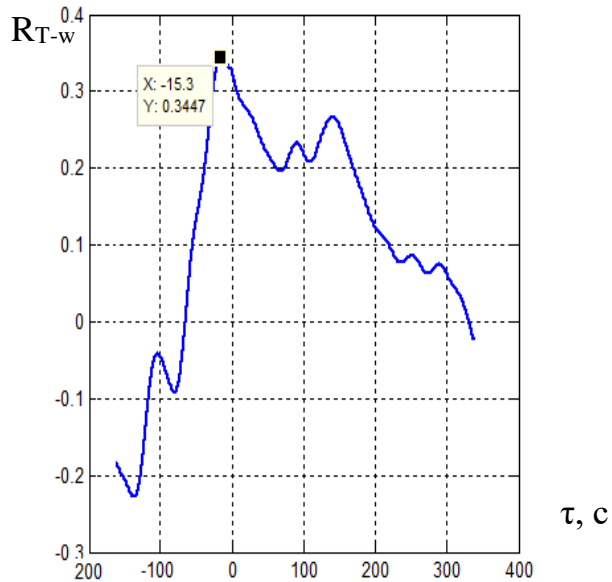
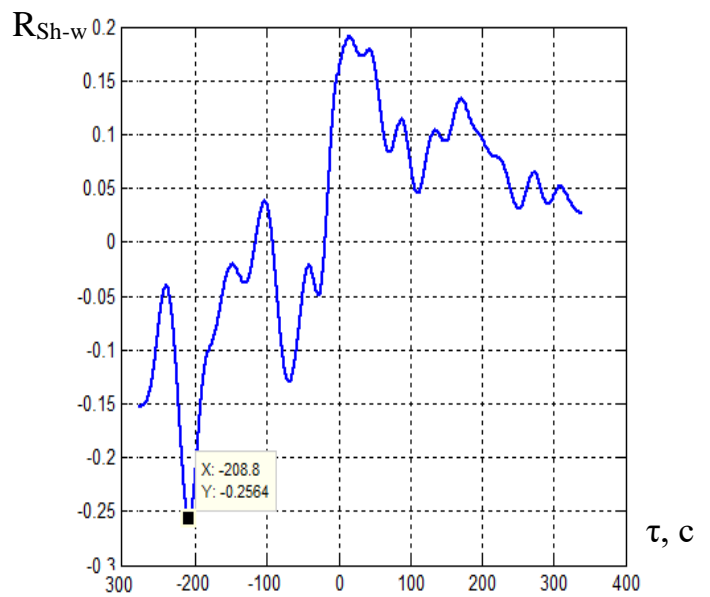
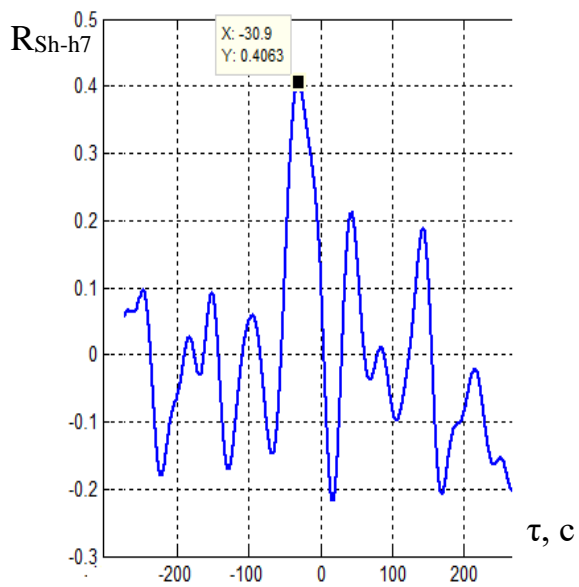
(в дужках вказаний номер каскаду)

<sup>20</sup> Ануфриев И.Е. Самоучитель MatLab 5.3/6.x. СПб. : БХВ-Петербург, 2002. 736 с.

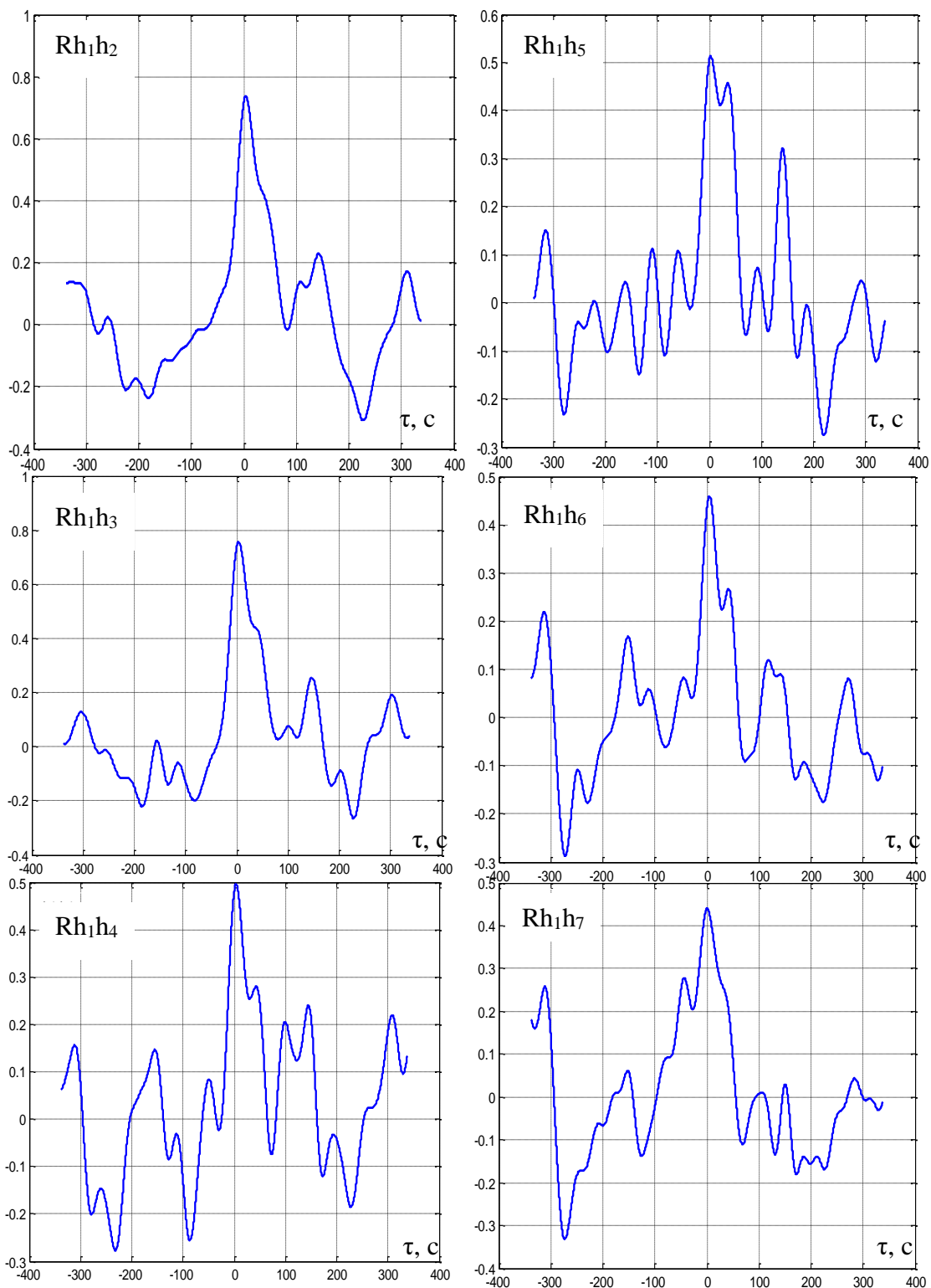
<sup>21</sup> Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. М. : В.школа, 2000. 383 с.

<sup>22</sup> Блохин А.В. Аппаратный анализ характеристик случайных процессов. М. : Энергия, 1976. 95 с.





**Рис. 6. Графіки нормованих кореляційні функції нормовані оцінки автокореляційних функцій**



**Рис. 7. Графіки оцінок взаємно кореляційних функцій висот киплячого шару**

Наступним кроком ідентифікації сигналів «вхід-вихід» є визначення оцінок спектральних щільностей на основі знайдених вище нормованих оцінок авто і взаємно кореляційних функцій<sup>23</sup>. Для їх знаходження застосовано спеціально-розроблений програмно-технічний комплекс.

В результаті чого отримуємо оцінки спектральних та взаємних спектральних щільностей, графіки яких представлені гладкими лініями на рис.8, рис. 9.

Аналіз графіків показав, що потужність зміни сигналів зосереджена в діапазоні частот від 0 до  $2 \cdot 10^{-1}$  рад/сек.

Для отримання кінцевих виразів авто- і взаємноспектральних щільностей сигналів «вхід-вихід» ЗКШ виконаємо апроксимацію їх оцінок методом спрощених логарифмічних характеристик (рис. 8, рис. 9).

В результаті такої апроксимації були отримані вирази (1.1)-(1.2):

$$S_{S_h S_h} = k_{S_h} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2, \quad (1.1)$$

$$S_{T T} = k_T \left| \frac{(s + a_1)(s + b_2)}{(s + b_3)(s^2 + 2d_1 b_4 s + b_4^2)} \right|^2, \quad (1.2)$$

$$S_{h_k h_k} = k_{h_k} \left| \frac{(s + c_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2, \quad (1.3)$$

$$S_{w w} = k_w \left| \frac{1}{(s + a_9)} \right|^2, \quad (1.4)$$

$$S_{S_h h_k} = k_{S_h h_k} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_5)}{(s + a_6)}, \quad (1.5)$$

$$S_{S_h w} = k_{S_h w} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_7)}{(s + a_8)}, \quad (1.6)$$

<sup>23</sup> Вентцель А.Д. Курс теории случайных процес сов. М.: Наука, 1975. 320 с.

$$S_{TW} = k_{TW} \left| \frac{(s+a_3)(s+b_2)}{(s+b_3)(s^2+2d_1b_4s+b_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s+a_7)}{(s+a_8)}, \quad (1.7)$$

$$S_{wh_k} = k_{wh_k} \left| \frac{(s+u_1)(s+u_2)}{(s+a_3)(s^2+2d_1a_4s+a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s^2+2d_2a_4s+a_4^2)(s^2+2d_3b_5s+b_5^2)}{(s+u_3)(s+u_4)}, \quad (1.8)$$

$$S_{h_n h_{n+1}} = k_{h_n h_{n+1}} \frac{(s+p_1)(s+p_2)(s+p_3)(s^2+2d_4p_4s+p_4^2)}{(s+a_3)(s^2+2d_1a_4s+a_4^2)} \quad (n=1, 2, \dots, 6)$$

Числові значення параметрів СЩ, що змінюються при зміні відстані  $\Delta$  від шиберу 3 (рис. 1.2) до центру мас каскаду<sup>24</sup>, наведено у табл. 3.2, причому<sup>25</sup>  $a_1 = 0.025$ ;  $a_2 = 0.4$ ;  $a_3 = 0.05$ ;  $a_4 = 0.09$ ;  $a_7 = 0.07$ ;  $a_8 = 0.01$ ;  $a_9 = 0.012$ ;  $b_2 = 0.0055$ ;  $b_3 = 0.006$ ;  $b_4 = 0.08$ ;  $b_5 = 0.14$ ;  $d_1 = 0.6$ ;  $d_2 = 0.4$ ;  $d_3 = 0.5$ ;  $d_4 = 0.3$ ;  $u_4 = 0.03$ .

Таблиця 1.2

**Зміна параметрів взаємної спектральної щільності висот  
киплячого шару між каскадами<sup>26</sup>**

Спектр. щільн	$k_{h_n h_{n+1}}$	$p_1,$ С <sup>-1</sup>	$p_2,$ С <sup>-1</sup>	$p_3,$ С <sup>-1</sup>	$p_4,$ С <sup>-1</sup>
$S_{h_1 h_2}$	$-2.57 \cdot 10^{-2}$	-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

<sup>24</sup> 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.

<sup>25</sup> Дженкінс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М. : Мир, 1971. Выпуск 1. 317 с.

<sup>26</sup> Дженкінс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М. : Мир, 1972. Выпуск 2. 292 с.



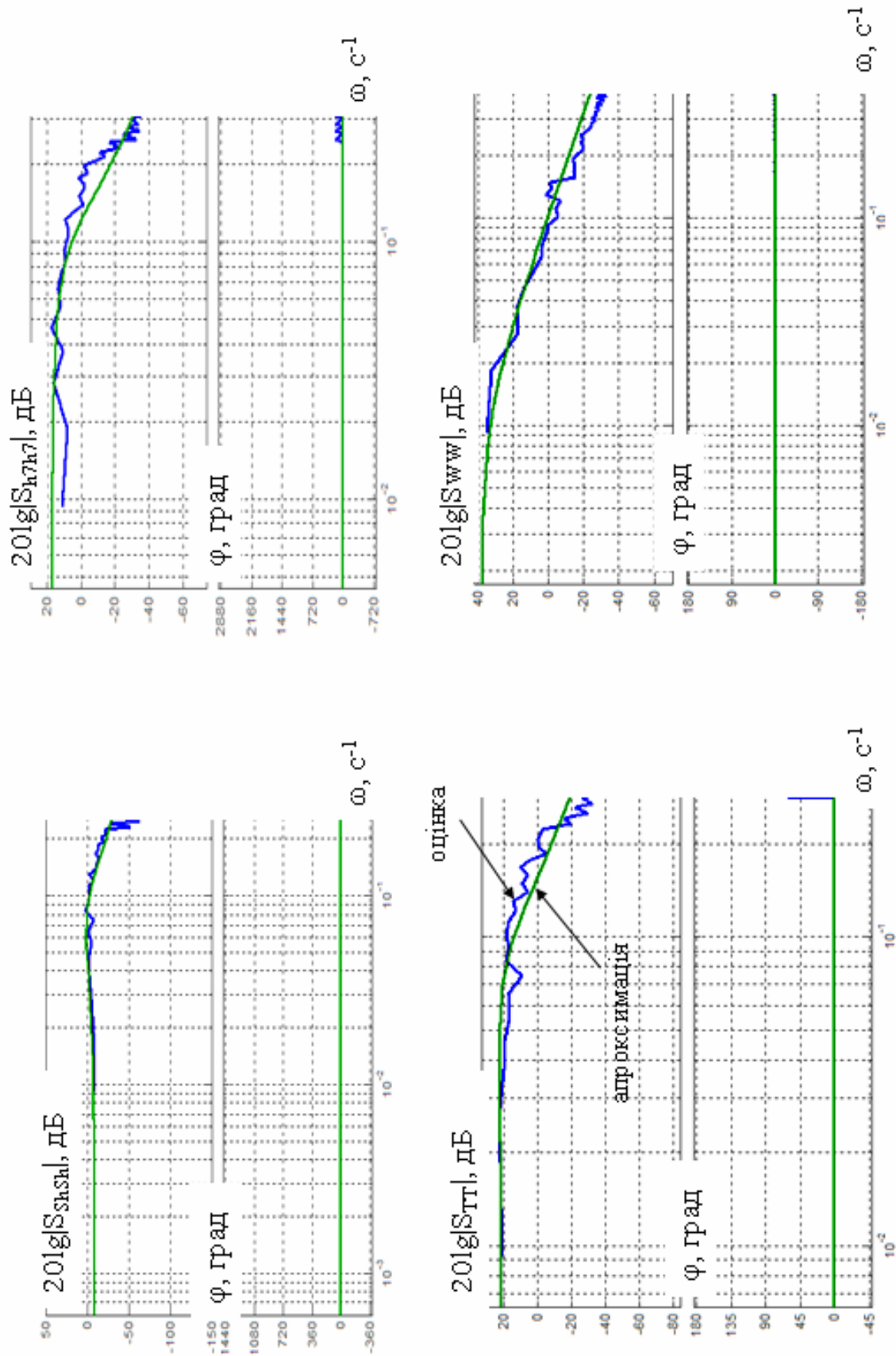


Рис. 8. Спектральні щільності сигналів «вхід-вихід»

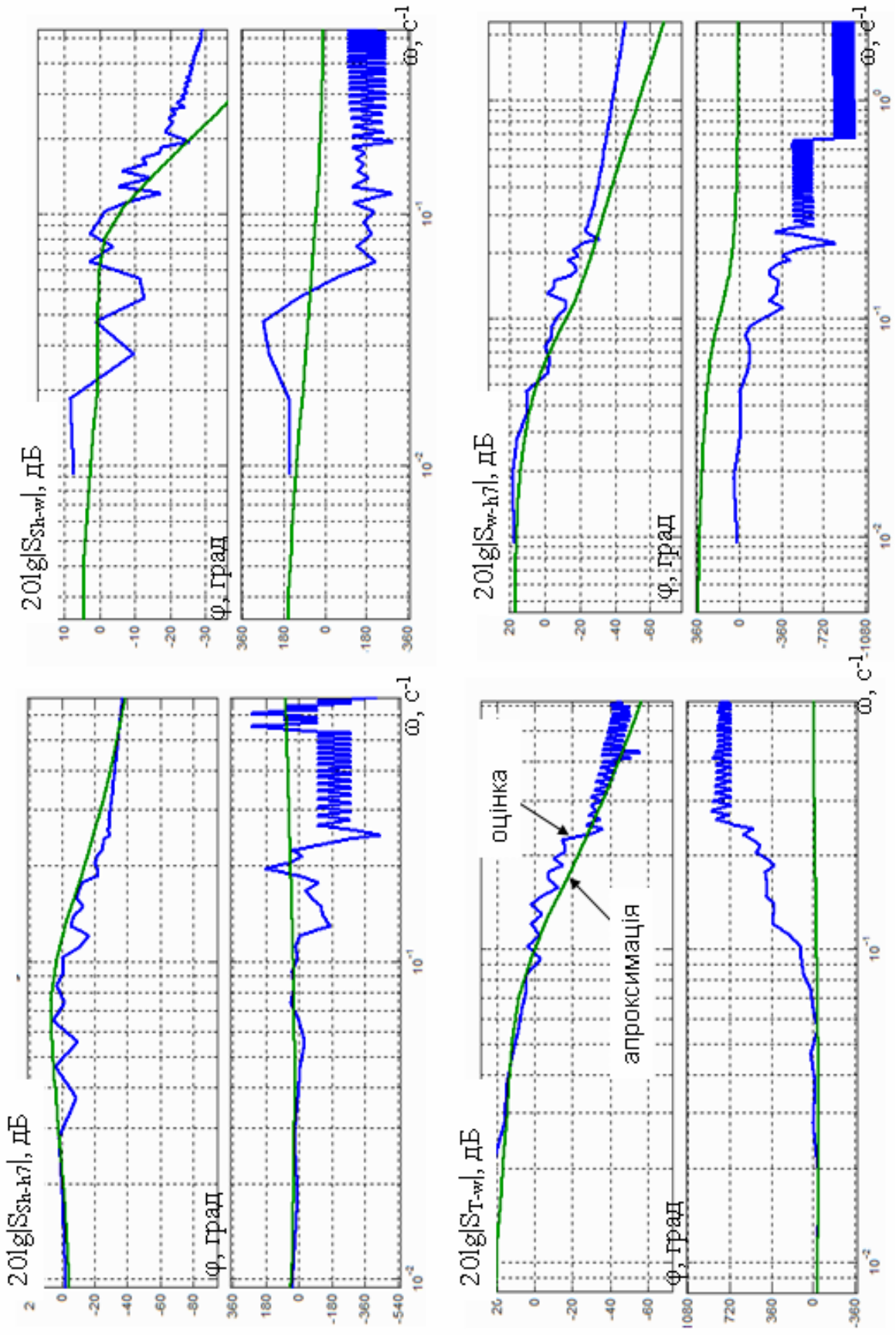


Рис. 9. Взаємні спектральні щільності сигналів «вхід-вихід»

Таблиця 1.3

**Передаточні коефіцієнти спектральних щільностей, що не змінюються, по-каскадно**

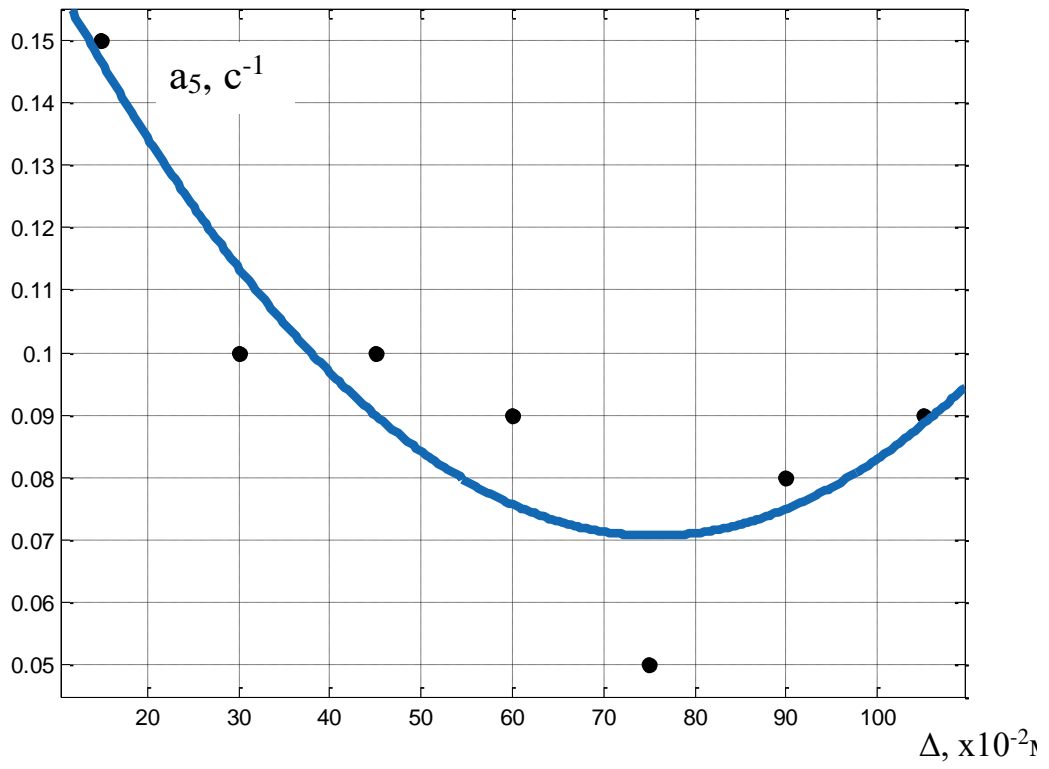
Спектр. щільн	$k_{S_h}$	Спектр. щільн	$k_T$	Спектр. щільн	$k_{S_h w}$ , %/м	Спектр. щільн	$k_{T w}$ , %/°C	Спектр. щільн	$k_w$
$S_{S_h S_h}$	$-5.8 \cdot 10^{-4}$	$S_{T T}$	$-1.9 \cdot 10^{-3}$	$S_{S_h w}$	$-3.75 \cdot 10^{-4}$	$S_{T w}$	$-3.5 \cdot 10^{-4}$	$S_{w w}$	$-1.08 \cdot 10^{-2}$

Таблиця 1.4

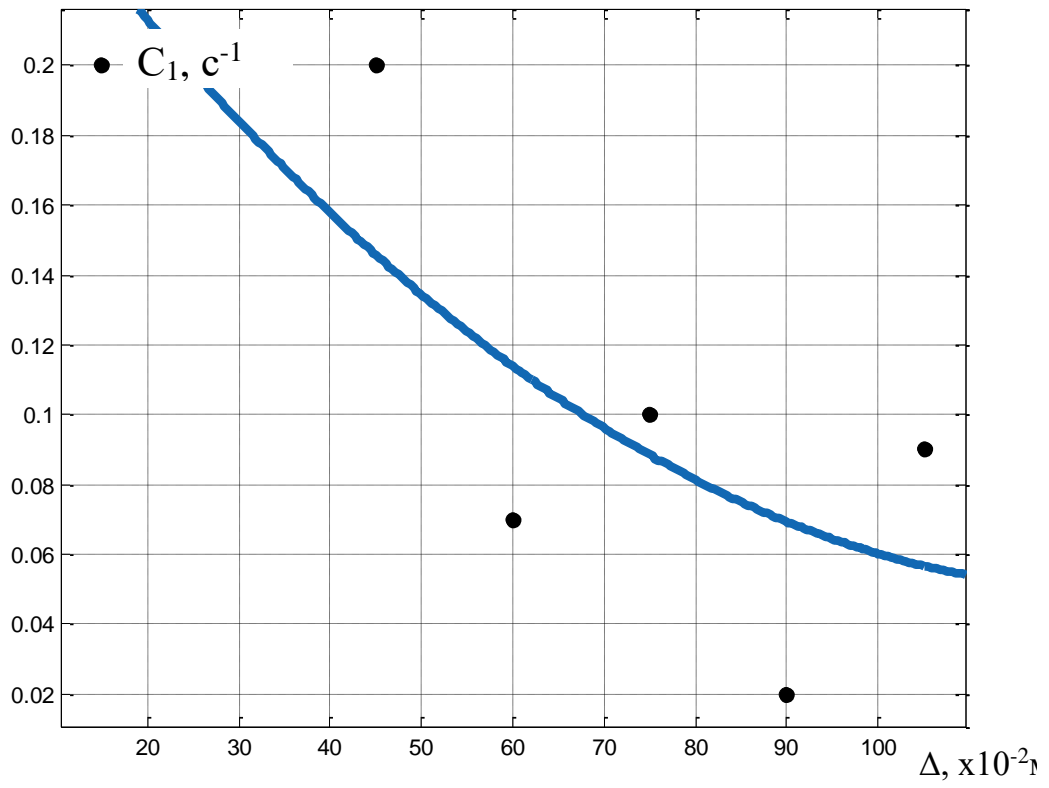
**Параметри спектральних щільностей, що змінюються по-каскадно**

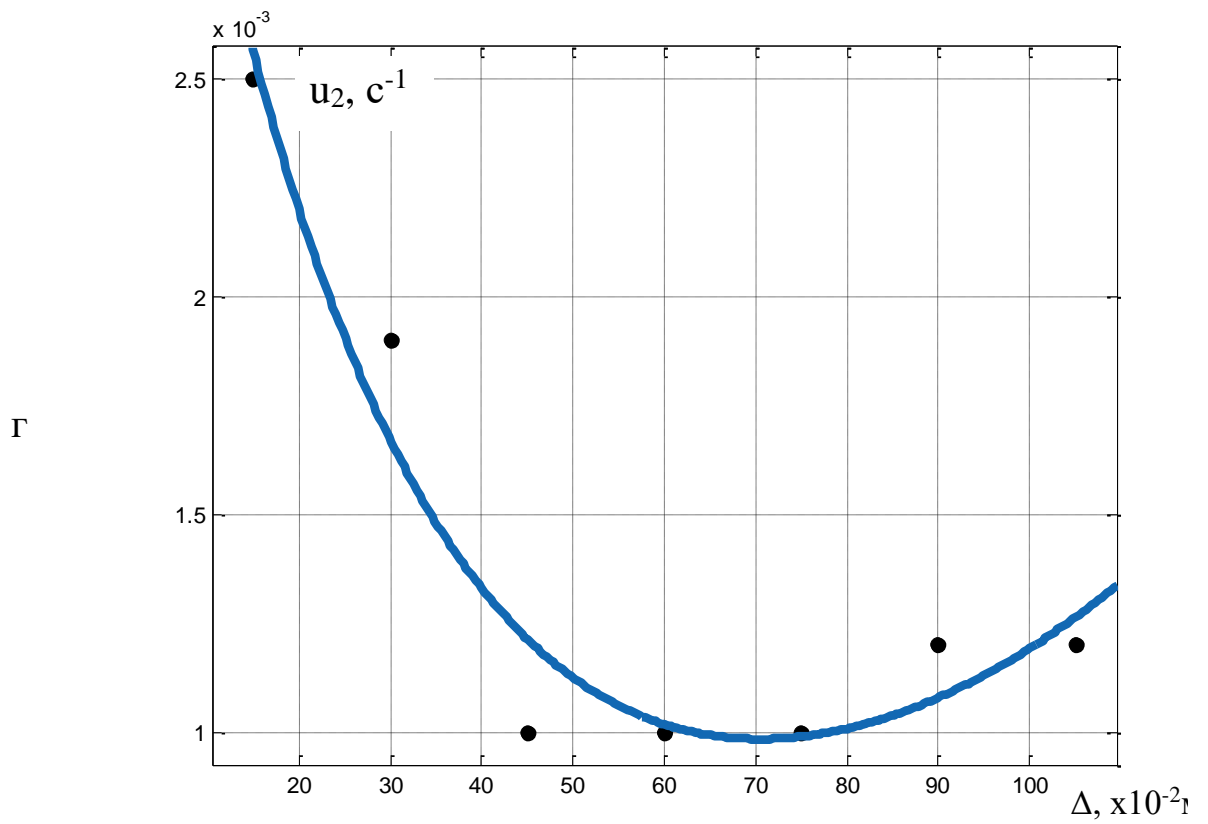
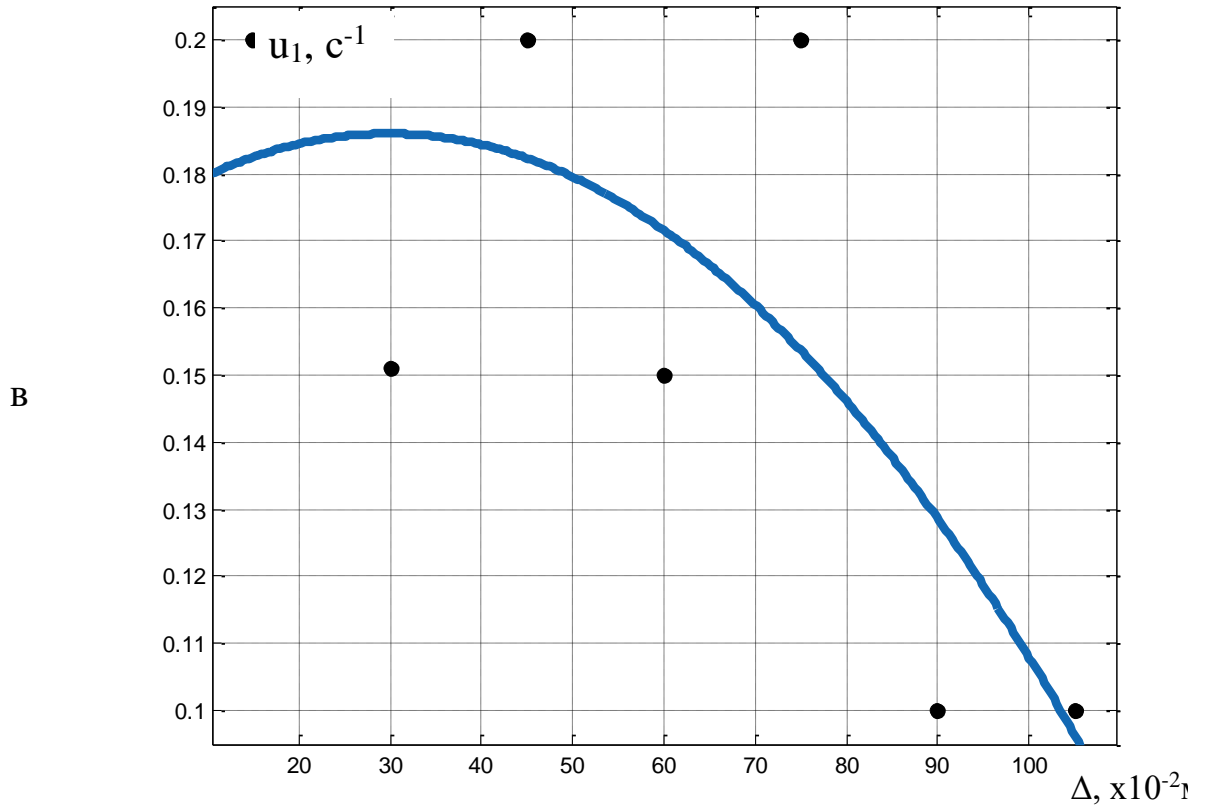
Спектр. щільн	$k_{S_h h_k}$	$a_5$ , с <sup>-1</sup>	$a_6$ , с <sup>-1</sup>	Спектр. щільн	$k_{h_k}$	$c_1$ с <sup>-1</sup>	Спектр. щільн	$k_{w h_k}$ , %/м	$u_1$ , с <sup>-1</sup>	$u_2$ , с <sup>-1</sup>	$u_3$ , с <sup>-1</sup>
$S_{S_h h_1}$	$-6.04 \cdot 10^{-4}$	0.15	0.022	$S_{h_1}$	$-1.4 \cdot 10^{-3}$	0.2	$S_{w h_1}$	$-3.13 \cdot 10^{-3}$	0.2	0.0025	0.009
$S_{S_h h_2}$	$-4.9 \cdot 10^{-4}$	0.1	0.018	$S_{h_2}$	$-0.6 \cdot 10^{-3}$	0.207	$S_{w h_2}$	$-1.7 \cdot 10^{-3}$	0.151	0.0019	0.009
$S_{S_h h_3}$	$-4.17 \cdot 10^{-4}$	0.1	0.018	$S_{h_3}$	$-0.63 \cdot 10^{-3}$	0.2	$S_{w h_3}$	$-1.95 \cdot 10^{-3}$	0.2	0.001	0.0015
$S_{S_h h_4}$	$-3.6 \cdot 10^{-4}$	0.09	0.03	$S_{h_4}$	$-2.05 \cdot 10^{-3}$	0.07	$S_{w h_4}$	$-1.4 \cdot 10^{-3}$	0.15	0.001	0.0012
$S_{S_h h_5}$	$-3.2 \cdot 10^{-4}$	0.05	0.022	$S_{h_5}$	$-6.34 \cdot 10^{-3}$	0.1	$S_{w h_5}$	$-1.39 \cdot 10^{-3}$	0.2	0.001	0.0019
$S_{S_h h_6}$	$-3.1 \cdot 10^{-4}$	0.08	0.022	$S_{h_6}$	$-8.1 \cdot 10^{-3}$	0.02	$S_{w h_6}$	$-1.94 \cdot 10^{-3}$	0.1	0.0012	0.0015
$S_{S_h h_7}$	$-2.98 \cdot 10^{-4}$	0.09	0.026	$S_{h_7}$	$-8.9 \cdot 10^{-3}$	0.09	$S_{w h_7}$	$-2.18 \cdot 10^{-3}$	0.1	0.0012	0.0015

a

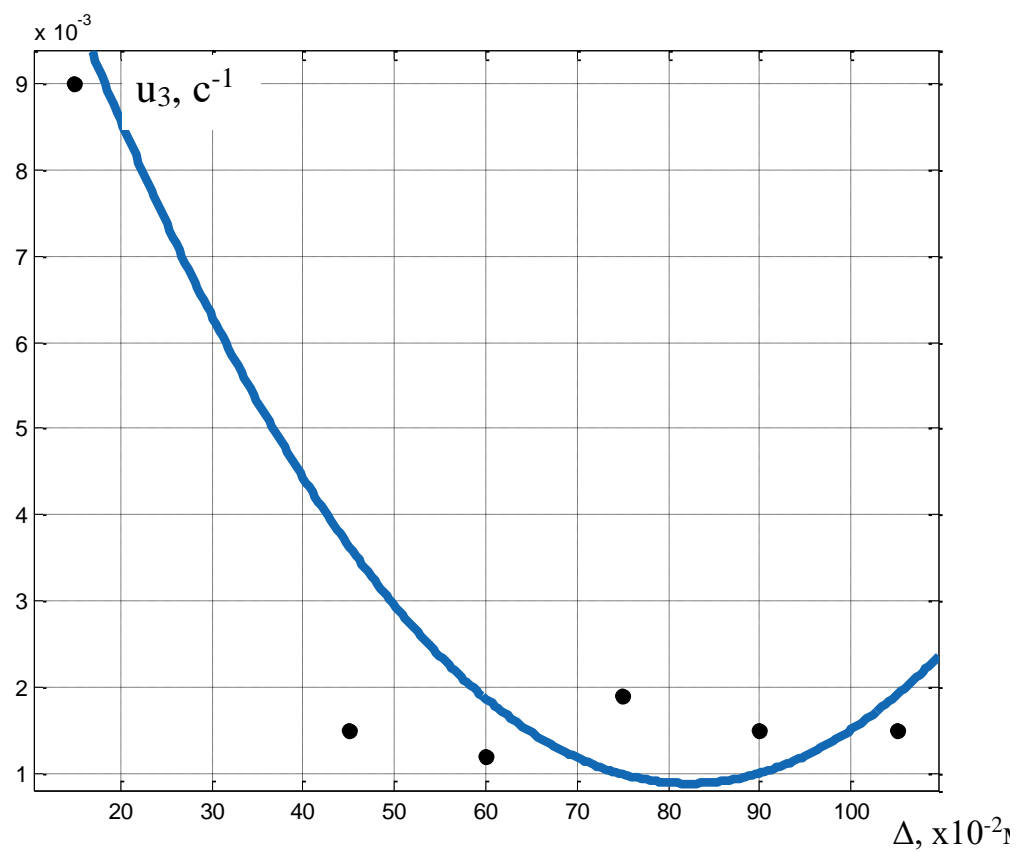


b

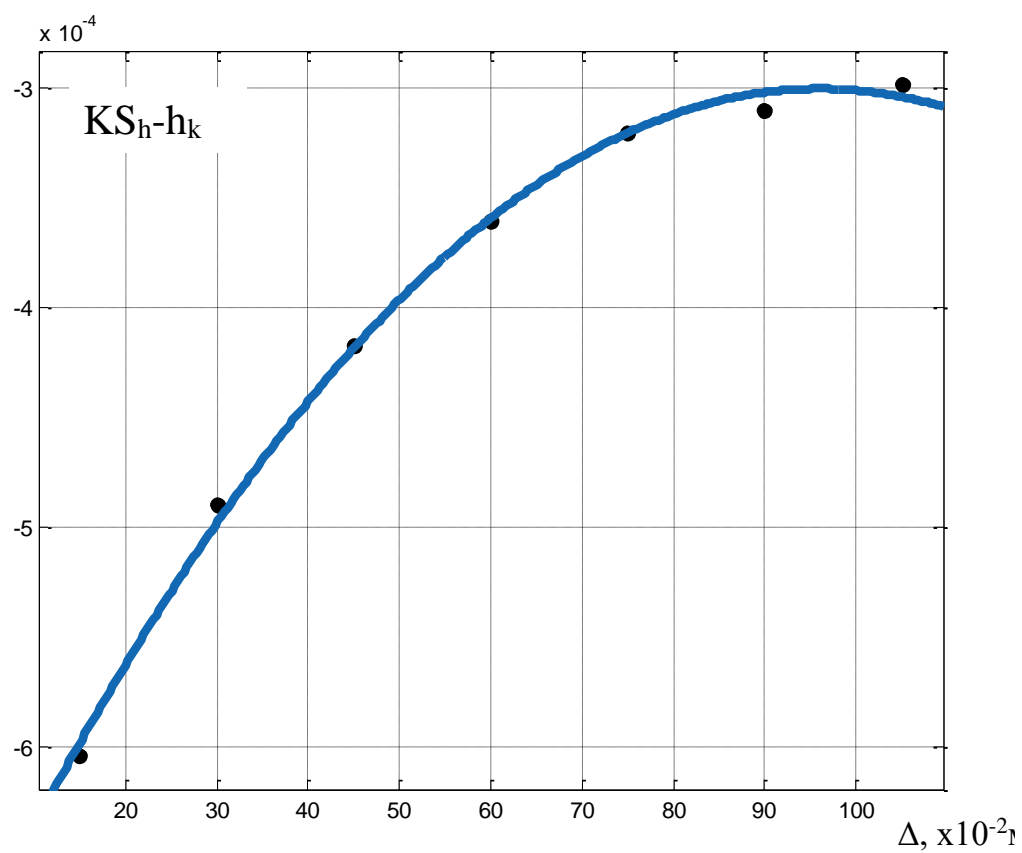


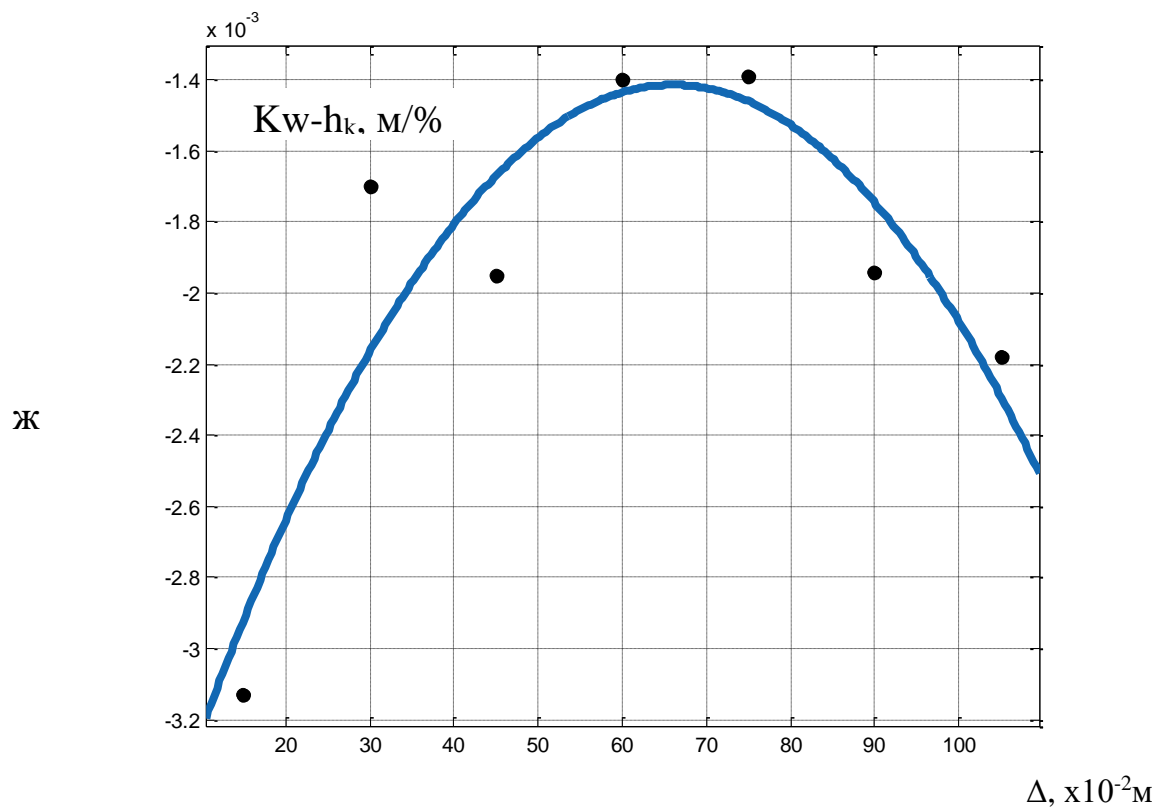
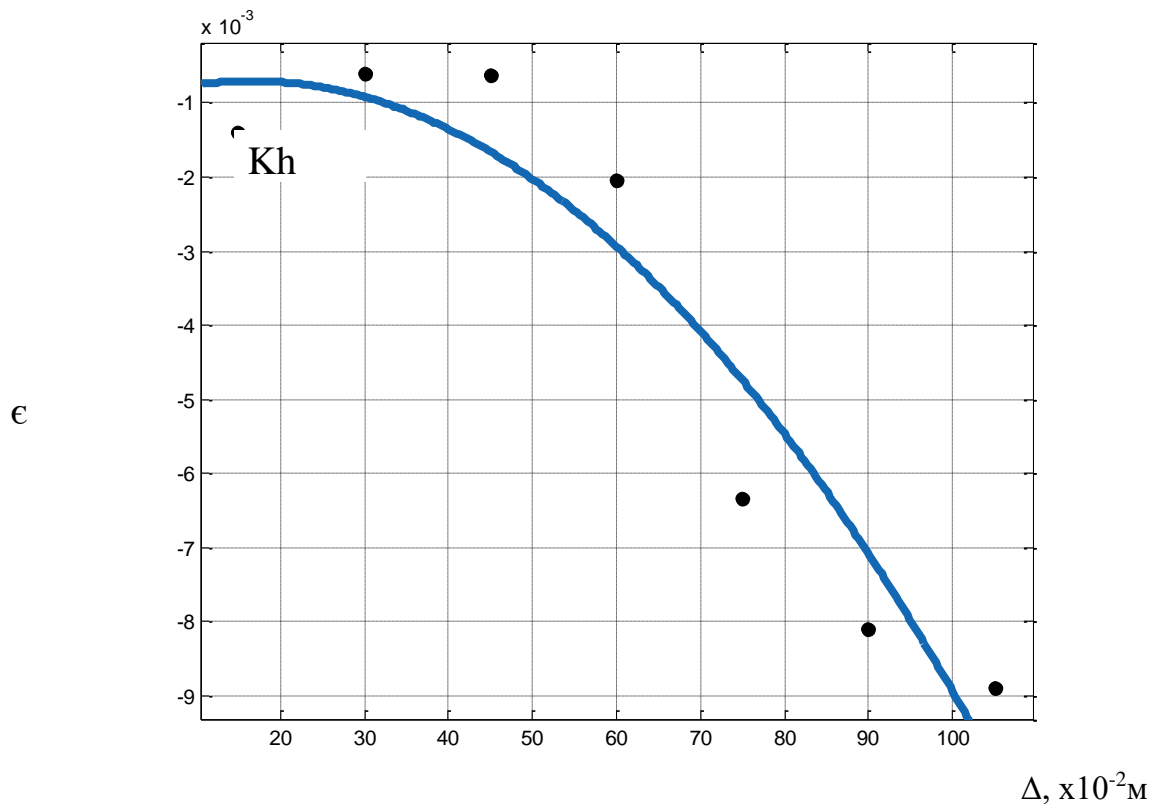


Д



e





**Рис. 10. Графіки залежностей параметрів виразів (1.1) – (1.9) по-каскадно**

Вирази (1.5) і (1.6) описують вплив зміни положення завантажуючого шибєру на зміну висоти киплячого шару по кожному з каскадів і на зміну кінцевої вологості відповідно. Частина цих спектральних щільностей має спільну структуру, що належить  $S_{S_h S_h}$ , і відрізняється лише частотами. Вказані частоти для виразу (1.5) мають спадаючу залежність, яка наведена на рис. 10а.

Вирази (1.7) і (1.8) показують зв'язок зміни кінцевої вологості з температурою теплоносія і висотою киплячого шару на будь-якому каскаді. В основі СЦ (1.8) покладено вираз для  $S_{h_k h_k}$ , а для (1.7) – СЦ  $S_{TT}$ . Зміна частот спектральної щільності  $S_{wh_k}$  показана на рис 10в, г, д, ж. Частоти  $u_1, u_2, u_3$  змінюють своє значення за квадратичною функцією.

Останнє співвідношення (1.9) встановлює взаємний вплив висот киплячого шару по кожному з семи каскадів. На основі графіків взаємних кореляційних функцій висот киплячого шару між каскадами побудована табл. 1.5.

Аналіз графіків (рис. 7) та табл. 1.5 дає змогу стверджувати, що зв'язок змін висот матеріалу в камері сушіння між всіма каскадами досить сильний, і ступінь цього впливу спадає по мірі віддаленості каскадів один від одного<sup>27</sup>.

Таблиця. 1.5

**Коефіцієнти кореляції висоти киплячого шару між каскадами**

	<b>h1</b>	<b>h2</b>	<b>h3</b>	<b>h4</b>	<b>h5</b>	<b>h6</b>	<b>h7</b>
<b>h1</b>	1.0	0.7	0.7	0.5	0.51	0.45	0.45
<b>h2</b>	0.7	1.0	0.85	0.7	0.65	0.61	0.6
<b>h3</b>	0.7	0.85	1.0	0.7	0.64	0.54	0.51
<b>h4</b>	0.5	0.7	0.7	1.0	0.7	0.7	0.61
<b>h5</b>	0.51	0.65	0.64	0.7	1.0	0.8	0.65
<b>h6</b>	0.45	0.61	0.54	0.7	0.8	1.0	0.75
<b>h7</b>	0.45	0.6	0.51	0.61	0.65	0.75	1.0

Таким чином, в результаті проведених досліджень була розв'язана задача ідентифікації сигналів багатовимірного об'єкту (ЗКШ), що працює в реальних експлуатаційних умовах, у вигляді авто- і взаємно спектральних щільностей. 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  $S_{wv}$ . Також загальними

<sup>27</sup> Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.



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

Отримані вирази є вихідними даними для виконання структурно-параметричної ідентифікації<sup>28</sup>, в результаті якої будуть знайдені матриці передаточних функцій ЗКШ та збурень, що діють на неї в процесі сушіння по-каскадно.

### **3. Ідентифікація динаміки зерносушарки з киплячим шаром та збурень, що діють на неї в реальних умовах роботи**

Ідентифікацію динаміки ЗКШ будемо проводити із застосування структурно-параметричної ідентифікації<sup>29</sup>, сенс якої полягає у тому, щоб за відомими спектральними щільностями вимірних сигналів  $S_{S_h S_h}$ ,  $S_{TT}$ ,  $S_{h_k h_k}$ ,  $S_{ww}$  і їх взаємними спектральними щільностями  $S_{S_h h_k}$ ,  $S_{S_h w}$ ,  $S_{T_w}$ ,  $S_{S_h w}$  та  $S_{w h_k}$  визначити структуру і параметри матриці передаточних функцій<sup>30</sup>  $G_{11}^k$  для кожного  $k$ -того каскаду ЗКШ, смугу пропускання, оцінити чисті запізнення між векторами сигналів «вхід-вихід»; відшукати транспоновану матрицю спектральних щільностей неконтрольованих збурень  $S'_{\psi\psi}$ .

Для визначення МПФ кожного з елементів множини моделей динаміки зерносушарки і МСЦ збурень, що діють на відповідний елемент в процесі роботи, був застосований метод ідентифікації з монографії.

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

---

<sup>28</sup> Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління. К.: Видавництво НАУ, 2003. 209 с.

<sup>29</sup> Азарсков В.Н., Блохін Л.Н., Житецкий Л.С. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации. Монография. К.: НАУ, 2006. 438 с.

<sup>30</sup> Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552 с.

об'єкта і збурень на основі даних інших шести каскадів наведені наведені у<sup>31</sup>.

Згідно технології виконаємо підстановку виразів (1.1)-(1.9) у рівняння у відповідне рівняння, в результаті чого знайдемо наступні матриці  $S_{uu}^{-1}$ ,  $S'_{ux}$  та  $S_{xx}$  для сьомого каскаду

$$S_{uu}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{-1718.2642(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)}{(s+0.025)(s-0.025)(s+0.4)(s-0.4)} & 0 \\ 0 & \frac{-512.8649(s+0.006)(s-0.006)(s^2+0.096s+0.0064)(s^2-0.096s+0.0064)}{(s+0.5)(s-0.5)(s+0.0055)(s-0.0055)} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$S'_{ux} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0003(s+0.025)(s-0.025)(s+0.09)(s+0.4)(s-0.4)}{(s+0.026)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ 0 \\ \frac{-0.00037(s+0.025)(s-0.025)(s+0.07)(s+0.4)(s-0.4)}{(s+0.009)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.00035(s+0.5)(s-0.5)(s+0.07)(s+0.0055)(s-0.0055)}{(s+0.01)(s+0.006)(s-0.006)(s^2+0.096s+0.0064)(s^2-0.096s+0.0064)} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$S_{xx} = \begin{bmatrix} \frac{-0.0009(s+0.09)(s-0.09)(s+0.4)(s-0.4)}{(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.0022(s+0.0012)(s+0.1)(s^2-0.072s+0.0081)(s^2-0.14s+0.0196)}{(s+0.0015)(s+0.03)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.0022(s-0.0012)(s-0.1)(s^2+0.072s+0.0081)(s^2+0.14s+0.0196)}{(s+0.0015)(s+0.03)(s+0.05)(s-0.05)(s^2+0.108s+0.0081)(s^2-0.108s+0.0081)} \\ \frac{-0.010843}{(s-0.012)(s+0.012)} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

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

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

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

$$D = \begin{bmatrix} \frac{0.024124(s+0.025)(s+0.4)}{(s+0.05)(s^2+0.108s+0.0081)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0.044157(s+0.5)(s+0.0055)}{(s+0.006)(s^2+0.096s+0.0064)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

<sup>31</sup> Осадчий С. І., Скриннік М.О., Скриннік І.О. Ідентифікація сигналів зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах. *Вісник Хмельницького національного університету* (Технічні науки). 2007. Т. 1. С. 38-41.

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

$$S_{\Delta x} = \begin{bmatrix} \frac{0.027(s + 0.1523)(s^2 + 0.1357s + 0.0071)}{(s + 0.05)(s + 0.03)(s^2 + 0.108s + 0.0081)} & \frac{0.072894(s + 0.026)(s^2 + 0.036s + 0.0088)}{(s + 0.012)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)} \\ -0.01025(s + 0.003)(s + 0.096) & \frac{0.072281(s + 0.09194)(s^2 + 0.046s + 0.0041)}{(s + 0.012)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Матриця  $T$  має наступну структуру

$$T = \begin{bmatrix} T(1.1) & T(1.2) & T(1.3) & T(1.4) \\ T(2.1) & T(2.2) & T(2.3) & T(2.4) \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

де компоненти матриці (3.6)  $T(i,j)$  описуються як

$$\begin{aligned} T(1.1) &= \frac{0.012393(s + 0.4)(s + 0.09)(s + 0.025)}{(s + 0.026)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)} \\ T(2.1) &= \frac{0.015539(s + 0.4)(s - 0.07)(s + 0.025)}{(s + 0.009)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)} \\ T(1.2) &= 0 \\ T(2.2) &= \frac{0.0079383(s + 0.5)(s + 0.07)(s + 0.0055)}{(s + 0.01)(s + 0.006)(s^2 + 0.096s + 0.0064)} \\ T(1.3) &= \frac{0.027247(s + 0.1523)(s^2 + 0.1357s + 0.007055)}{(s + 0.05)(s + 0.03)(s^2 + 0.108s + 0.0081)} \\ T(2.3) &= \frac{0.072894(s + 0.02641)(s^2 + 0.03614s + 0.008788)}{(s + 0.012)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)} \\ T(2.4) &= \frac{0.0723(s + 0.09194)(s^2 + 0.04594s + 0.004096)}{(s + 0.012)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Тоді, виконавши сепарацію виразу (3.16), знайдемо  $T_0 + T_+$

$$T_0 + T_+ = \begin{bmatrix} \{T_0 + T_+\}(1.1) & \{T_0 + T_+\}(1.2) & \{T_0 + T_+\}(1.3) & \{T_0 + T_+\}(1.4) \\ \{T_0 + T_+\}(2.1) & \{T_0 + T_+\}(2.2) & \{T_0 + T_+\}(2.3) & \{T_0 + T_+\}(2.4) \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

де елементи матриці (3.8) мають наступний вигляд

$$\begin{aligned}
\{T_0 + T_+\}(1.1) &= \frac{0.012393 (s+0.4) (s+0.09) (s+0.025)}{(s + 0.026)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\
\{T_0 + T_+\}(2.1) &= \frac{0.015539 (s+0.4)(s-0.07)(s+0.025)}{(s + 0.009)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\
\{T_0 + T_+\}(1.2) &= 0; \\
\{T_0 + T_+\}(2.2) &= \frac{0.0079383 (s+0.5)(s+0.07) (s+0.0055)}{(s+0.01) (s+0.006) (s^2 + 0.096s + 0.0064)}; \\
\{T_0 + T_+\}(1.3) &= \frac{0.027247 (s+0.1523) (s^2 + 0.1357s + 0.007055)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\
\{T_0 + T_+\}(2.3) &= \frac{0.072894(s + 0.02641)(s^2 + 0.03614s + 0.008788)}{(s + 0.012)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\
\{T_0 + T_+\}(1.4) &= \frac{-0.01025(s + 0.003)(s + 0.096)}{(s + 0.05)(s + 0.03)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}; \\
\{T_0 + T_+\}(2.4) &= \frac{0.0723(s + 0.09194)(s^2 + 0.04594s + 0.004096)}{(s + 0.012)(s + 0.05)(s^2 + 0.108s + 0.0081)}.
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Завершальним кроком методики ідентифікації є визначення шуканої блочної матриці  $\Phi$ , структура якої наступна:

$$\Phi = [F_{11}, \quad F_{12}],$$

де матриця передаточних функцій від вектору сигналів керування до вектору вихідних координат  $F_{11}$  дорівнює

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{0.51373e - 05(s + 0.09)}{(s + 0.03)} & 0 \\ \frac{0.64413e - 02(s - 0.07)}{(s + 0.01)} & \frac{0.17955(s + 0.07)}{(s + 0.01)} \end{bmatrix}; \tag{3.10}$$

а матриця передаточних функцій формувального фільтру збурень  $F_{12}$  виглядає як

$$F_{12} = \begin{bmatrix} \frac{2.7247e-05 (s+0.1523) (s^2 + 0.1357s + 0.007055)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} & \frac{-1.025e-05 (s+0.002993) (s+0.09572)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} \\ \frac{0.072894 (s+0.02641) (s^2 + 0.03614s + 0.008788)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} & \frac{0.072281 (s+0.09194) (s^2 + 0.04594s + 0.004096)}{(s+0.05) (s+0.03) (s^2 + 0.108s + 0.0081)} \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

При відомій матриці (3.11) транспонована матриця збурень, які діють на сьомому каскаді, визначається за формулою

$$S'_{\psi\psi} = F_{12} F_{12}^*$$

Ідентичні розрахунки були проведені і по іншим каскадам.. Порівняльний аналіз матриць  $F_{11}^k$  та  $F_{12}^k$  по всім 7-ми каскадам дозволив визначити, що всі вони мають загальний вигляд

$$F_{11}^k = \begin{bmatrix} F_{11}(1,1) & F_{11}(1,2) \\ F_{11}(2,1) & F_{11}(2,2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_1(\Delta)(s+w_1(\Delta))}{s+w_2(\Delta)} e^{-s\tau_{S_h h}(\Delta)} & 0 \\ \frac{\alpha_2(s-\varphi)}{s+p_2} e^{-s\tau_{S_h w}} & \frac{\alpha_3(s+\varphi)}{s+p_2} e^{-s\tau_{Tw}} \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

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

Зміну параметрів матриці  $F_{11}^k$  на кожному каскаді зведено до табл. 3.6. З таблиці 3.6 видно, що елементи  $F_{11}(2,1)$  та  $F_{11}(2,2)$  не змінюють своїх коефіцієнтів по-каскадно, на відміну від  $F_{11}(1,1)$ . Сталість параметрів пояснюється тим, що і температура агента, і вологість матеріалу вимірюються лише в одній точці, а 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 і з внутрішніх шарів насіння.

Таблиця 1.6

Параметри елементів матриці  $F_{11}^k$

Каскад (к)	$\alpha_1$ , м/м x $10^{-1}$	$\alpha_2$ , %/м x $10^2$	$\alpha_3$ , %/°C	$w_1$ , с <sup>-1</sup>	$w_2$ , с <sup>-1</sup>	$\varphi$ , с <sup>-1</sup>	$p_2$ , с <sup>-1</sup>	$\Delta$ , м x $10^{-2}$
№ 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;  $\Delta$  – відстань між каскадами (див рис. 2)

Елемент  $F_{11}(1, 1)$  характеризує зв'язок висоти шару насіння зі зміною положення шибера. Виконавши апроксимацію даних табл. 3.6

методом найменших квадратів у середовищі Matlab<sup>32</sup>, отримані наступні аналітичні вирази

$$\alpha_1(\Delta) = 0,07107 \cdot e^{-0,04036 \cdot \Delta} + 0,06863 \cdot e^{-0,003224 \cdot \Delta}, \quad (3.13)$$

$$w_1(\Delta) = 0,4482 \cdot e^{-0,147 \cdot \Delta} + 0,1037 \cdot e^{-0,002148 \cdot \Delta}, \quad (3.14)$$

$$w_2(\Delta) = 0,06535 \cdot e^{-0,1396 \cdot \Delta} + 0,01232 \cdot e^{-0,007514 \cdot \Delta}, \quad (3.15)$$

$$\tau_{Sh-h}(\Delta) = 33,25 \cdot \Delta + 111,4. \quad (3.16)$$

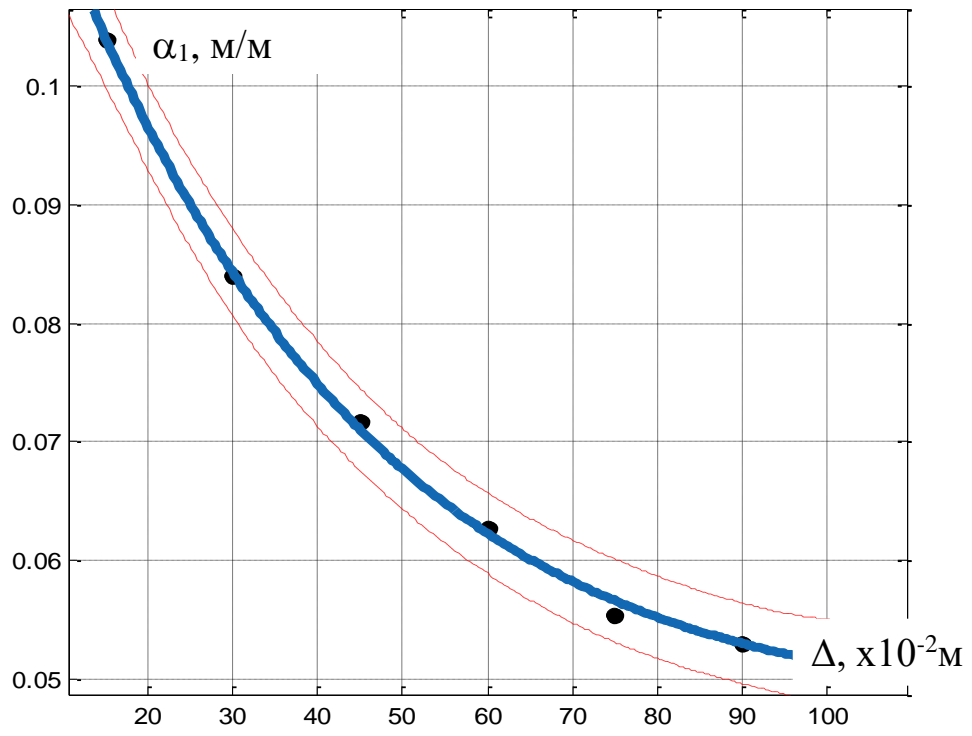
Ступінь відповідності отриманих залежностей експериментальним даним характеризують графіки, представлені на рис.11 разом з 95% довірчими границями.

Те, що елемент  $F_{11}(1,1)$  має в своєму складі аперіодичну та форсуючу ланки пояснюється інерційністю реагування, яка виникає через властивість каскаду накопичувати зернову масу до деякого значення  $h$  (так як кут нахилу решета невеликий і складає  $5-8^\circ$ ), розподіляти її по всій площі каскаду, а потім, під дією сили тяжіння, переміщувати її з каскаду на каскад. Зміна частоти  $w_1(\Delta)$  за законом (3.14) 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 частоту зрізу каскаду зерносушарки за зміною положення шибєру. На нижньому каскаді, найбільш віддаленому від шибєру, висота киплячого шару змінюється найбільш інтенсивно, далі – інтенсивність зміни спадає за законом (3.15). Коефіцієнт  $\alpha_1$  змінюється згідно виразу (3.13), 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.

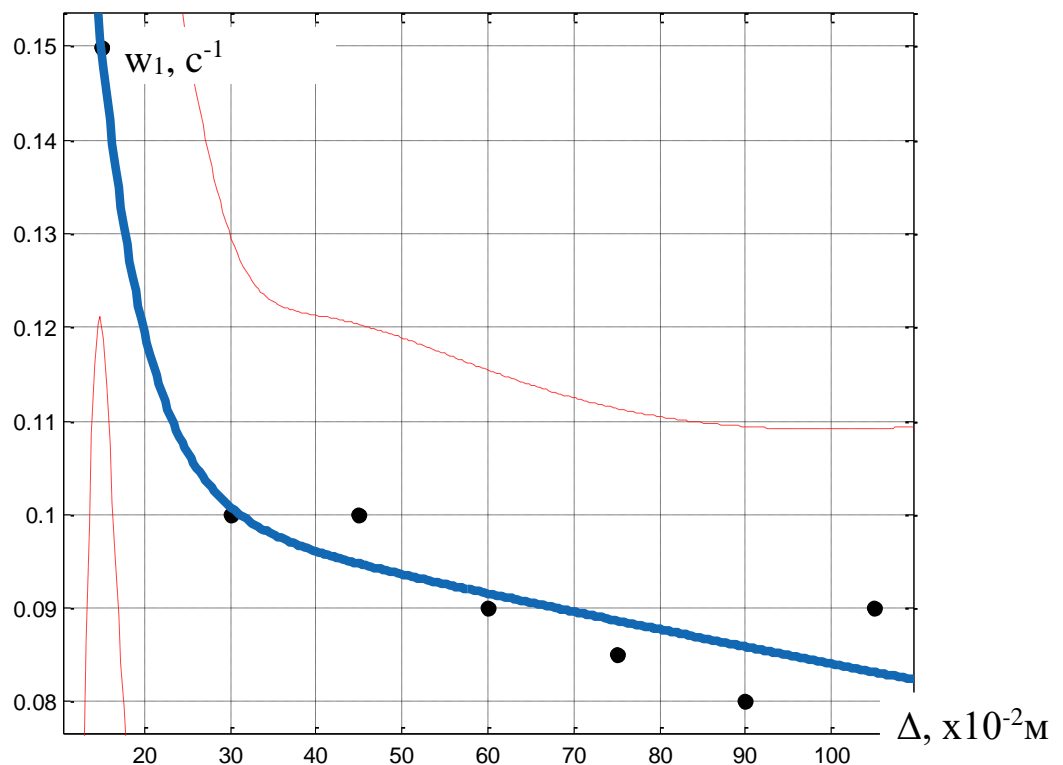
---

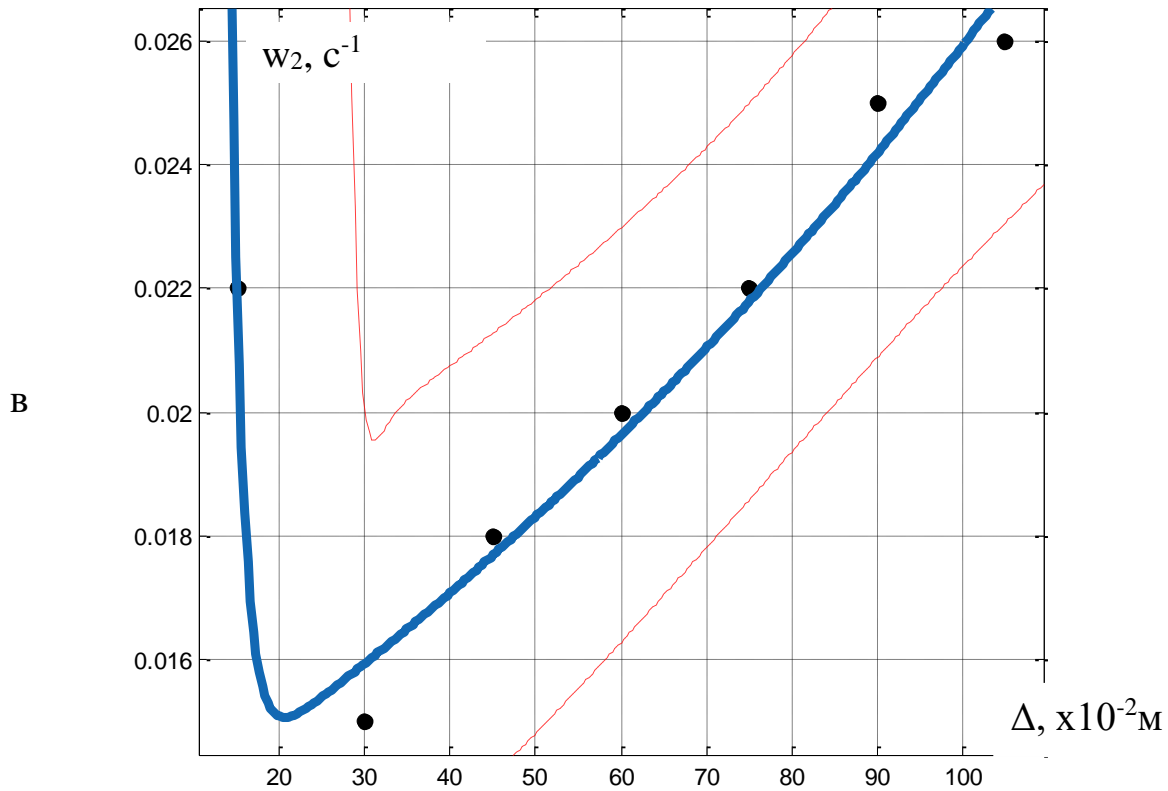
<sup>32</sup> Краснопрошина А.А., Репникова Н.Б., Ильченко А.А. Современный анализ систем управления с применением MATLAB, Simulink, Control System [учебн пособ]. К. : «Корнійчук», 1999. 144 с.

a



b





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

Величина  $\tau_{S_h h}$  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 (3.16).

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  $S_h-h$  залишається загальною.

## **ВИСНОВКИ**

Отримані таким чином матриці передаточних функцій об'єкта та збурюючих діянь дозволяють перейти до наступного етапу автоматизації процесу сушіння – це розробки системи автоматизованого регулювання параметрами процесу.

## **АНОТАЦІЯ**

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. Якщо на сьогодні більшість відомих нам сушарок мають свою математичну модель, то дана зерносушарка з киплячим шаром є новою, неповністю вивченою і тому потребує свого математичного опису з метою розробки системи автоматичного регулювання її параметрами. Тому в даній роботі показано практичне застосування методики ідентифікації сигналів «вхід-вихід» сушарки для дисперсного матеріалу каскадного типу. За спектральними та взаємно спектральними щільностями сигналів, застосувавши технологію структурно-параметричної ідентифікації, була знайдена матриця передаточних функцій сушарки, що представляє собою багатовимірний динамічний об'єкт з розподіленими параметрами із запізненням, на який в процесі експлуатації діють різні збурюючі фактори. Також були встановлені закони зміни параметрів блочної матриці та з'ясовані зв'язки між елементами матриці.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Петренко, М. М., Богатирьов Д.В., Скриннік І.О. Експериментальні дослідження впливу параметрів зерносушарки каскадного типу на показники роботи. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин (Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник Кіровоградського національного технічного університету). Кіровоград, 2006. № 36. С. 29-34.
2. Осадчий С. І., Скриннік М.О., Скриннік І.О. Ідентифікація сигналів зерносушальної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах. *Вісник Хмельницького національного університету (Технічні науки)*. 2007. Т. 1. С. 38-41.
3. Ладанюк А.П., Кишенько В.Д., Луцька Н.М., Івашук В.В. Методи сучасної теорії управління. Навч посібник. К.: НУХТ, 2010. 196 с.
4. Дьяконов В.П., Круглов В.А. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: Специальный справочник. 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., Блохин Л.Н., Житецкий Л.С. Методология конструирования оптимальных систем стохастической. Монография. К.: НАУ, 2006. 438 с.
7. Скриннік І.О. Обґрунтування параметрів зерносушарки каскадного типу для обробки насіння у киплячому шарі: дис. ... канд. техн. наук: Кіровоградський національний технічний університет. Кіровоград, 2010. 148 с.

8. 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.

9. *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.

10. 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.

11. Федотова М.О., Скриннік І.О., Осадич 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]

12. 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>]

**Information about the authors:**

**Fedotova Marianna Oleksandrivna,**

Candidate of Technical Sciences, Assistant,  
Central Ukrainian National Technical University  
8, University Ave., Kropyvnytskyi, 25000, Ukraine

**Skrynnik Ivan Oleksandrovych,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Central Ukrainian National Technical University  
8, University Ave., Kropyvnytskyi, 25000, Ukraine

**Darienko Victor Viktorovich,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Central Ukrainian National Technical University  
8, University Ave., Kropyvnytskyi, 25000, Ukraine