Chapter 15

СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ НАСІННЯ СОНЯШНИКА

Федотова М. О., Дідик О. К., Заворуєв Р. С.
DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-26-588-4-15

ВСТУП

Соняшник походить з Північної та Центральної Америки. Його культивували ще стародавні індіанці понад 3000 років тому. Вони застосовували насіння в їжу, виробляли з нього олію, а також застосовували рослину для лікувальних цілей і ритуалів.

У 16 століть іспанці завезли соняшник до Європи. Спочатку вирощували як декоративну рослину, але згодом його люди почали використовувати для вирощування олії.

В Україні соняшник набув великої популярності у 19 столітті. Його стали широко вирощувати, втративши це невибагливу культуру, яка добре росте в українському кліматі. Ніні Україна є одним із світових лідерів з виробництва соняшникової олії.

Використання соняшника

– *Олія* – основний продукт переробки насіння. Використовується в кулінарії, косметології, медицині.

– *Харчування* – страви вживають сирим, смаженим, дають у випічку та десерти.

– *Корм для тварин* – шрот (залишки після віджимання олії) є цінним кормом для худоби.

– *Біодизель* – соняшникова олія використовується як екологічне паливо.

Таким чином, соняшник став не лише частиною аграрної культури, а й важливою складовою економіки багатьох країн.

Насіння соняшника багате на корисні поживні речовини, які позитивно впливають на організм людини. Ось як основні компоненти діють на здоров'я:

1. Вітаміни та їх вплив

– Вітамін Е (токоферол) – потужний антиоксидант, захищає клітини від старіння, зміцнює імунітет, покращує стан шкіри та волосся.

– Вітаміни групи В (В1, В6, В9) – підтримують роботу нервової системи, сприяють зниженню стресу, покращують пам'ять і концентрацію.

2. Мінерали у складі соняшника та їх роль для організму людини.

– Магній – знижує рівень стресу, покращує сон, радує роботу серця та м’язів.

– Калій – підтримує здоровий артеріальний тиск, нормалізує роботу серцево-судинної системи.

– Фосфор – необхідний для здоров'я кісток і зубів, покращує роботу мозку.

– Селен – потужний антиоксидант, захищає організм від ракових захворювань, покращує імунітет.

– Цинк – сприяє загоєнню ран, покращує стан шкіри, волосся та нігтів, імунітет.

3. Білки

– Містять незамінні амінокислоти, накопичені для зростання та відновлення м'язів.

– Сприяють зміцненню імунної системи та покращують обмін речовин.

4. Жири та їх вплив на обмінні процеси в організмі людини

– Омега-6 жирні кислоти – підтримують здоров'я серця та судин.

– Омега-9 (олеїнова кислота) – знижує рівень «поганого» холестерину, що знижує ризик атеросклерозу.

5. Харчові волокна

– Покращують травлення, допомагають уникнути закрепів.

– Стимулюють ріст корисних бактерій у кишечнику.

6. Антиоксиданти

– Захищають організм від ураження, зменшують ризики хронічних захворювань, таких як діабет, серцево-судинні захворювання та рак.

Україна є світовим лідером у вирощуванні та експорті соняшника, що робить цю культуру стратегічно важливою для економіки держави. Виробництво насіння соняшника впливає на аграрний сектор, забезпечує валютні надходження та підтримує продовольчу безпеку.

1. Лідерство України на світовому ринку

– Перше місце у світі за виробництвом і експортом соняшникової олії.

– Частка України в світовому експорті соняшникової олії – понад 35-40%.

– Головні імпортери української продукції: ЄС, Китай, Туреччина, Індія, Єгипет.

2. Вплив на економіку

– Аграрний сектор формує значну частину ВВП України, а соняшник – одна з найбільш прибуткових культур.

– Виробництво олії та продуктів переробки створює робочі місця та приносить мільярдні доходи до бюджету.

– Експорт насіння та олії забезпечує валютні надходження, що стабілізує фінансову систему країни.

3. Використання та стратегічне значення

– Харчова промисловість: виробництво соняшникової олії, маргарину, кондитерських виробів.

– Кормова галузь: макуха та шрот використовуються у тваринництві.

– Експортний потенціал: Україна має розвинуту переробну інфраструктуру, що дозволяє експортувати не лише сировину, а й готову продукцію.

4. Виклики та перспективи

– Зміни клімату можуть впливати на врожайність.

– Війна та логістичні обмеження створюють ризики для експорту.

– Переробка в Україні дає можливість експортувати продукцію з більшою доданою вартістю, що приносить більші прибутки.

Насіння соняшника – це стратегічний продукт для України, який забезпечує економічну стабільність, продовольчу безпеку та зміцнює позиції країни на світовому ринку аграрної продукції.

Проблематика. Війна в Україні суттєво вплинула на вирощування соняшника, призвівши до змін у посівних площах, географії вирощування та економічних показниках аграрного сектору.

1. Зміни в посівних площах та географії вирощування

Традиційно соняшник вирощували в південних та східних областях України, таких як Херсонська, Запорізька та Донецька. Однак через бойові дії у 2022 році посівні площі в цих регіонах значно скоротилися:

– Херсонська область: з 338 тис. га у 2021 році до 8,6 тис. га у 2022 році.

– Запорізька область: з 531,1 тис. га у 2021 році до 60,6 тис. га у 2022 році.

Це призвело до зміщення вирощування соняшника в західні та центральні області, де аграрії адаптувалися до нових умов, замінюючи кукурудзу та інші культури на соняшник.

2. Економічні виклики та прибутковість

У 2023 році аграрний сектор зіткнувся зі збитковістю у вирощуванні зернових культур. Олійні культури, зокрема соняшник, показали мінімальну збитковість, тоді як соя та ріпак забезпечили незначну прибутковість.

3. Вплив на врожайність та виробництво

За даними супутникового моніторингу, у частково окупованих регіонах, таких як Херсонська область, врожайність пшениці зменшилася на 20% у 2022 році. Це свідчить про значні втрати врожаю через військові дії та покидання земель фермерами.

4. Адаптація аграріїв та зміна стратегії

Через логістичні труднощі та високі витрати на вирощування кукурудзи багато аграріїв перейшли на вирощування соняшника, сої та гречки, які є менш витратними та більш стійкими до поточних умов.

Отже, війна призвела до значних змін у вирощуванні соняшника в Україні, змусивши аграріїв адаптуватися до нових реалій та переглянути стратегії ведення сільського господарства і, як результат, застосовувати більш прогресивні методи сушіння зернових.

Одним з найефективніших методів зниження вологості насіння є його сушіння в киплячому шарі Цей метод забезпечує рівномірне сушіння, збереження поживних речовин і високу енергоефективність.

Основні переваги сушіння у киплячому шарі:

1. Швидкість та ефективність

– Висока інтенсивність теплообміну забезпечує швидке зниження вологості насіння.

– Скорочення часу сушіння у 2-3 рази в порівнянні з традиційними методами.

2. Рівномірне висушування

– Повітряний потік рівномірно розподіляє тепло по всій масі насіння.

– Уникається перегрів або підгоряння продукту, що покращує якість кінцевої продукції.

3. Збереження поживних речовин

– Мінімізуються втрати вітамінів та жирних кислот, особливо вітаміну Е та Омега-6.

– Відсутність перегріву запобігає окисленню олій у насінні.

4. Енергоефективність

– Використовується менше енергії у порівнянні з конвекційними сушарками.

– Скорочуються витрати на паливо та електроенергію.

5. Мінімізація втрат продукту

– Зменшується механічне пошкодження насіння під час обробки.

– Менше лущення та втрат маси насіння.

6. Автоматизація процесу

– Система легко налаштовується та контролюється за допомогою датчиків вологості та температури.

– Можливість точного регулювання параметрів для досягнення оптимальної якості.

Метод сушіння насіння соняшника у киплячому шарі є сучасним і вигідним рішенням для аграрного сектора. Він забезпечує швидкість, якість, енергоефективність і максимальне збереження корисних речовин, що робить його оптимальним вибором для великих виробництв та агропідприємств.

При Центральноукраїнському національному технічному університету було розроблено принципово нову конструкцію зерносушарки для сушіння різних дисперсних продуктів[1], зокрема і насіння соняшника[2].

Перші кроки на шляху автоматизації такої конструкції були висвітлені в (14), де послідуючими задачами були окреслені проблематика вимірювання висотки киплячого шару та безпосередній синтез самої система автоматичного регулювання за неповними вимірами вихідних параметрів об'єкта (сушарки), про що й піде мова далі.

1. Оцінювання зміни висоти киплячого шару насіння соняшнику за даними про його кінцеву вологість

Для розробки системи керування процесом сушіння в зерносушарці з киплячим шаром потрібно достовірно володіти інформацією про вхідні і вихідні сигнали об'єкта. Якщо зміну температури **T**, положення завантажуючого шиберу $\mathbf{S_h}$ і кінцеву вологість **w** дисперсного матеріалу виміряти нескладно, то зміну висоти зерна **h** на каскадах в процесі сушіння виміряти неможливо без порушення його гідродинаміки.

Як показали результати первинної обробки експериментально виміряних масивів сигналів[3], зміна висот киплячого шару по каскадах корельована не лише з кінцевою вологістю матеріалу, а й корельовані між собою теж.

Тому в даному розділі пропонується синтезувати оптимальну систему спостереження, яка, вимірюючи один з вихідних параметрів

[1] Пат. UA 10346 U Україна №u 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

[2] 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.

[3] 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.

зерносушарки, а саме – кінцеву вологість **w**, формувала б оптимальну за дисперсією похибки оцінку висоти киплячого шару **h** на кожному з семи каскадів.

Нехай кінцева вологість матеріалу w може бути виміряна датчиком вологості ємнісного типу з МПФ $K_{ЄМ}$:

$$K_{ЄМ} = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{0,5}{8s+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{0.0625}{s+0.125} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{0.0625}{s+\omega_K} \end{bmatrix} \quad (1)$$

із спектральною щільністю завади вимірювання $S_{\varphi\varphi}^{ЄМ}$

$$S_{\varphi\varphi}^{ЄМ} = \frac{1.5^2}{3\pi}, \quad (2)$$

або мікрохвильовим датчиком вологості з МПФ K_M

$$K_M = \begin{bmatrix} 0 & 0,0625 \end{bmatrix} \quad (3)$$

із спектральною щільністю завади вимірювання $S_{\varphi\varphi}^{M}$

$$S_{\varphi\varphi}^{M} = \frac{0.5^2}{3\pi}. \quad (4)$$

Тоді задача синтезу спостерігача полягає у тому, щоб за відомими МПФ датчиків вологості $K_{ЄМ}$, K_M із відповідними спектральними щільностями завад вимірювання $S_{\varphi\varphi}^{ЄМ}$, $S_{\varphi\varphi}^{M}$, поліноміальною матрицею $P_к$, що відповідає k-тому каскаду, та відомою МСЩ збурень $S_{\psi\psi}^{k}$, що діють на цьому каскадів, необхідно:

1. Визначити для всіх каскадів ЗКШ структуру і параметри системи спостереження $F_{ЄМ}^{k}$ на базі датчика вологості ємнісного типу[4];

2. Обчислити показник якості оцінювання спостерігачем $F_{ЄМ}^{k}$ вихідних сигналів для всіх k каскадів[5];

3. Обрати той каскад, показник якості оцінювання для якого є мінімальним[6];

---

[4] Осадчий, С.І., Калита М.О., Скринік І.О., Рева О.М. Ідентифікація динаміки зерносушильної установки з киплячим шаром як об'єкта автоматизації. Доклады XV Международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика-2008» (м. Одеса, 22-26 вересня 2008 р). Одесса: ОНМА, 2008. Т. 2. С. 877-879

[5] Володарский Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента. К.: В. школа, 1987. 279 с.

[6] 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

4. Для обраного каскаду визначити МПФ F_M^k на базі мікрохвильового датчика вологості і обрахувати його показник якості;

5. Обрати датчик вологості того типу, система спостереження на базі якого доставляє мінімум показника якості.

Для вирішення поставленої задачі було використано методику[7], результати виконання якої приведені для каскаду №7. Відповідно розробленій методиці (п. 2.3) і враховуючи структуру і параметри матриці Р для сьомого каскаду (3.26), (3.27) та МСЩ $S'_{\psi\psi}$, структура і параметри якої відповідають (3.32) спершу було сформовано матрицю $\left(S_{\psi 0\psi 0}\right)'$ за (2.34)

$$S'_{\psi 0\psi 0} = \frac{0{,}079618(s^2 + 0.2513s + 0.02371)(s^2 - 0.2513s + 0.02371)}{(s + 0.125)(s - 0.125)(s + 0.01)(s - 0.01)}, \quad (5)$$

а потім виконано її факторизації, в результаті чого було визначено вираз для

$$D = \frac{0.28217(s^2 + 0.2513s + 0.02371)}{(s + 0.125)(s + 0.01)}. \quad (6)$$

Матриця Т відповідно має наступну структуру

$$T = \begin{bmatrix} \dfrac{-0{,}00037911(s - 0.125)(s - 0{,}01)}{(s - 0{,}125)(s + 0{,}026)(s - 0{,}01)(s^2 - 0{,}2513s + 0{,}02371)} \\ \dfrac{-0{,}0020062(s - 0{,}125)(s - 0{,}01)}{(s - 0{,}125)(s + 0{,}01)(s - 0{,}01)(s^2 - 0{,}2513s + 0{,}02371)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Виконаємо сепарацію попереднього виразу і здобудемо

$$(T_0 + T_+) = \begin{bmatrix} \dfrac{-0{,}01226}{(s + 0{,}026)} \\ \dfrac{-0{,}076207}{(s + 0{,}01)} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Після підстановки (6), (8) згідно була отримана МПФ системи спостереження для сьомого каскаду $F_{\text{СМ}}^k$. Виконання вказаної методики для решти каскадів дозволило отримати загальну для всіх них

[7] Осадчий С. І., Калита М.О., Скриннік 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

матрицю передаточних функцій системи спостереження $F^k_{ЄМ}$, структура якої наступна:

$$F^k_{ЄМ} = \frac{s+0.125}{s^2+0.2476s+0.02278}\begin{bmatrix} \frac{k_{11}(s+0.01)}{s+\omega_{11}} \\ 0.032644 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Якщо ж проаналізувати коефіцієнти та елементи отриманих матриць, то можна побачити, що структура їх ідентична, зокрема елемент (s+0,125) відноситься до вимірювача вологи, а елементи (s+0,01) та частина знаменника ($s+\omega_{11}$) належать безпосередньо самому об'єкту керування (3.26).

Тоді загальний вигляд матриці передаточних функцій системи спостереження з урахуванням аналізу отриманих даних можна сформувати так:

$$F^k_{ЄМ} = \frac{s+\omega_K}{s^2+0.2476s+0.02278}\begin{bmatrix} \frac{k_{11}(s+\omega_{12})}{s+\omega_{11}} \\ 0.032644 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{k1} \\ F_{k2} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Елемент F_{k1} визначає зміну висоти киплячого шару $\hat{h}$ на кожному з каскадів за даними датчика вологості. А от елемент F_{k2} залишається незмінним, адже характеризує вимірювання вологості $\hat{w}$ на виході з ЗКШ, яка контролюється лише в одній точці, а не по кожному каскаду.

Параметри отриманої моделі для каскадів № 1–№ 7 зведено до табл. 1.

Таблиця 1

Значення параметрів МПФ спостерігача $F^k_{ЄМ}$

Каскад / Коефіці-єнт	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
k_{11} (x 10^{-3})	0.075199	0.041714	0.047935	0.038755	0.032481	0.046265	0.052184

В такому разі дисперсія погрішностей оцінювання висоти дисперсного матеріалу $D_{\hat{h}}$ та вологості D_ω може бути визначена як:

$$D_{\hat{h}} = \frac{1}{j}\int_{-j\infty}^{j\infty} See_{(1.1)}(s)ds \qquad D_\omega = \frac{1}{j}\int_{-j\infty}^{j\infty} See_{(2.2)}(s)ds, \quad (12)$$

В результаті застосування виразу (3.53) були отримані дисперсії похибок оцінювання висоти матеріалу по кожному з семи каскадів і кінцевої вологості насіння. Чисельні значення дисперсій зведено до табл. 3.12.

Таблиця 2

Значення похибки (дисперсії) оцінювання спостерігачем $F^k_{\Є M}$

Спостерігач	каскад / Сигнал, характеристика		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
$F^k_{\Є M}$	$\hat{h}$	дисперсія	0,00872	0,00762	0,00731	0,00805	0,00750	0,00698	**0,00677**
		сер.кв.від хил	0,093	0,087	0,085	0,089	0,087	0,084	0,082
	$\hat{w}$	дисперсія	0,08279	0,08279	0,08279	0,08279	0,08279	0,08279	0,08279
		сер.кв.від хил	0,09099	0,09099	0,09099	0,09099	0,09099	0,09099	0,09099

Як видно з таблиці, найменшу похибку оцінювання має система спостереження, розрахована для каскаду № 7.

Наступним етапом рішення задачі є визначення структури і параметрів МПФ спостерігача для обраного каскаду № 7 на базі мікрохвильового датчика вологості з МПФ виду (13) із спектральною щільністю завади вимірювання (3.46) згідно його паспортних даних.

Після виконання п. 1 – п. 5 методики синтезу спостерігача, було здобуто матрицю F^k_M, структура якої наступна:

$$F^k_M = \frac{1}{s+0.06896}\begin{bmatrix} \dfrac{0.030678(s+\omega_{12})}{s+\omega_{11}} \\ 1 \end{bmatrix}. \qquad (13)$$

Показник якості оцінювання спостерігачем F^k_M на каскадів № 7 був визначений за інтегралами (12). Отримані значення дисперсій оцінювання системою $F^k_{\Є M}$ та F^k_M зведено до табл. 13.

Таблиця 3

Значення похибки (дисперсії) оцінювання вихідних сигналів на каскаді № 7 спостерігачем $F^k_{\Є M}$ та F^k_M на сьомому каскаді

Дисперсія	$F^k_{\Є M}$	F^k_M
D_h	0,00677	0,00860
D_w	0,08279	2,4679

Як видно, мінімальну дисперсію оцінювання зміни вологості та висоти дисперсного матеріалу на каскаді № 7 має спостерігач F^k_{CM}. Тому доцільно обрати датчик вологості з МПФ КєМ, адже саме він забезпечуватиме системі спостереження найвищі показники точності оцінювання зміни висоти зернового матеріалу за зміною його кінцевої вологості.

Знайдемо оптимальну структуру і параметри системи спостереження при варіюванні співвідношення збурення/завада, що описуються СЩ.

Якщо МСЩ збурення $S'_{\psi\psi}$, що діє на k-тому каскаді, має структуру (10), а завада системі вимірювання описуються виразом в загальному вигляді як

$$S'_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_\varphi^2}{\pi}, \tag{14}$$

то поділимо рівняння (3.55) на коефіцієнт $\frac{\sigma_{11}^2}{\pi}$, що винесений за знак матриці (14) і отримаємо, що

$$S'_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_\varphi^2}{\sigma_{11}^2}. \tag{15}$$

Якщо покласти, що

$$\gamma_2 = \frac{\sigma_\varphi}{\sigma_{11}}, \tag{16}$$

то

$$S'_{\varphi\varphi} = \gamma_2^2. \tag{17}$$

Рівняння прийме вигляд:

$$S'_{\psi 0\psi 0} = \frac{\sigma_{11}^2}{\pi}\left(A\begin{bmatrix} \tilde{S}_{11} & \gamma_1\mu\tilde{S}_{12} \\ \gamma_1\mu\tilde{S}_{21} & \gamma_1{}^2\tilde{S}_{22} \end{bmatrix} A_* + \gamma_2^2 \right), \tag{18}$$

де А – деякий вираз.

Діапазон зміни величин γ_1 і γ_2 знайдемо з урахуванням, що:

а) дійсне значення висоти киплячого шару знаходиться в межах 1,3…1,6 см, і вона буде оцінена за рахунок застосування системи спостереження з МПФ виду (18).

При проведені експерименту кінцева вологість насіння соняшника склала 11,5%, то складемо пропорцію з урахуванням σ_{11} та σ_{22} (табл. 3 для сьомого каскаду). Так, при w=11,5% (робоча вологість) σ_{22}=12,914.

Значить при максимальному (w=20%) і мінімальному значенні (w=11,0%) $\sigma_{22\ \min}$ =12,353 і $\sigma_{22\ \max}$ =16,283.

Так як σ_{11} характеризує висоту киплячого шару і її робоче значення (згідно табл. 3.10 σ_{11}=27,18), то

$$\gamma_{1\ \min} = \frac{\sigma_{22\ \min}}{\sigma_{11}} = \frac{12.353}{27.178} = 0.45, \tag{19}$$

$$\gamma_{1\ \max} = \frac{\sigma_{22\ \max}}{\sigma_{11}} = \frac{16.283}{27.178} = 0.6, \tag{20}$$

тобто діапазон для **γ_1=[0,45…0,6]**

б) завада вимірювальній системі описується

$$S'\varphi\varphi = \frac{\sigma_\varphi^2}{\pi} = \frac{\left(\Delta/3\right)^2}{\pi}, \tag{21}$$

де Δ – абсолютна погрішність вимірювальної системи (Δ_{min}=0,5% ; Δ_{max}=2,5% за паспортними даними датчика вологості).

$$\gamma_{2\ \min} = \frac{\sigma_{\varphi\ \min}}{\sigma_{11}} = \frac{0,5/3}{27.178} = \frac{0.167}{27.178} = 0.009$$
$$\gamma_{2\ \max} = \frac{\sigma_{\varphi\ \max}}{\sigma_{11}} = \frac{2,5/3}{27.178} = \frac{0.83}{27.178} = 0.03 \tag{22}$$

Значить робочим діапазоном зміни коефіцієнта γ_2 є **γ_2=[0,009…0,03].**

Побудуємо таблицю (табл. 4), котра вміщує зміну оцінки вихідних сигналів (дисперсію оцінки зміни висоти і вологості киплячого шару) системою спостереження при різних змінах коефіцієнтів γ_1 і γ_2.

Таблиця 4

Зміна дисперсій оцінювання висоти D_h і вологості D_ω на каскаді № 7 при варіюванні коефіцієнтами γ_1 та γ_2

γ_1	γ_2						дисперсії
		0,01	**0,015**	**0,02**	**0,025**	**0,03**	
	0,4	2,24	3,91	5,55	4,78	4,1128	**x10^{-10} D_h**
		0,1877	0,2627	0,2713	0,2543	0,3477	**D_ω**
	0,45	8,1240	1,6418	2,986	2,8235	2,98	**x10^{-10} D_h**
		0,6089	0,6413	0,6751	0,7101	0,7282	**D_ω**
	0,5	2,8235	2,986	3,51	3,91	2,24	**x10^{-10} D_h**
		0,7466	0,8038	0,625	0,6413	0,4912	**D_ω**
	0,55	2,37	4,32	4,438	5,53	5,8	**x10^{-10} D_h**
		0,5625	0,4778	0,5331	0,59	0,6089	**D_ω**
	0,6	5,27	5,8	6,36	7,62	7,29	**x10^{-10} D_h**
		0,5931	0,8236	0,8851	1,0421	1,1154	**D_ω**

Аналізуючи табл. 4, не складно впевнитись, що сума дисперсій буде залежати лише від дисперсії D_ω, ($x10^{-10}$ D_h дисперсією по висоті можна знехтувати), тобто оптимальні значення співвідношень збурень і похибки вимірювальної системи будуть відповідати при $D_\omega \to \min$ **(**D_ω=0,1877 при γ_1=0,4 γ_2=0,01**)** дисперсія оцінки зміни висоти киплячого шару D_h=2,24x10^{-10} і вологості D_w=0,1877, а їх середньоквадратичне відхилення складає: $\sigma_h = 14{,}9 \cdot 10^{-6}$ і σ_ω=0,43. Тоді абсолютна погрішність вимірювання системою спостереження наступна:

$$\Delta_h = \sqrt{3 \cdot \sigma_h} = \sqrt{3 \cdot 14{,}9 \cdot 10^{-6}} = 0{,}0067 м = 6{,}7 мм$$
$$\Delta_\omega = \sqrt{3 \cdot \sigma_\omega} = \sqrt{3 \cdot 0{,}43} = 1{,}14\% \qquad (23)$$

Графічно це можна показати поверхнею (рис. 1)

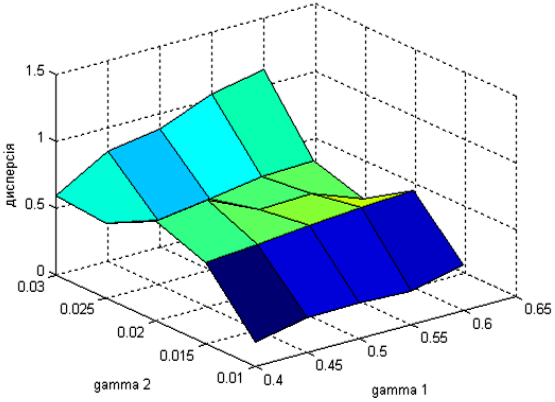


Рис. 1. Поверхня, що характеризує оцінювання системою спостереження F_{CM}^{k} дисперсій вихідних сигналів на каскаді № 7 при зміні співвідношень γ_1 та γ_2

В результаті застосування методики було отримано структуру спостерігача при оптимальних співвідношеннях **γ_1=0,4** та **γ_2=0,01**:

$$F = \begin{bmatrix} \dfrac{-7.8249e-005(s+0.125)(s+0.01)}{(s^2+0.454s+0.09519)(s+0.026)} \\ \dfrac{1.452(s+0.125)}{(s^2+0.454s+0.09519)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(1,1) \\ F(2,1) \end{bmatrix}. \qquad (24)$$

Отже, в даному пункті роботи було доведено, що властивість взаємного впливу між вихідними сигналами сушарки може бути покладена в основу методу оцінки зміни висоти киплячого шару насіння

за зміною його вологості на виході із ЗКШ, а також для обґрунтування методу обрання датчика вологості.

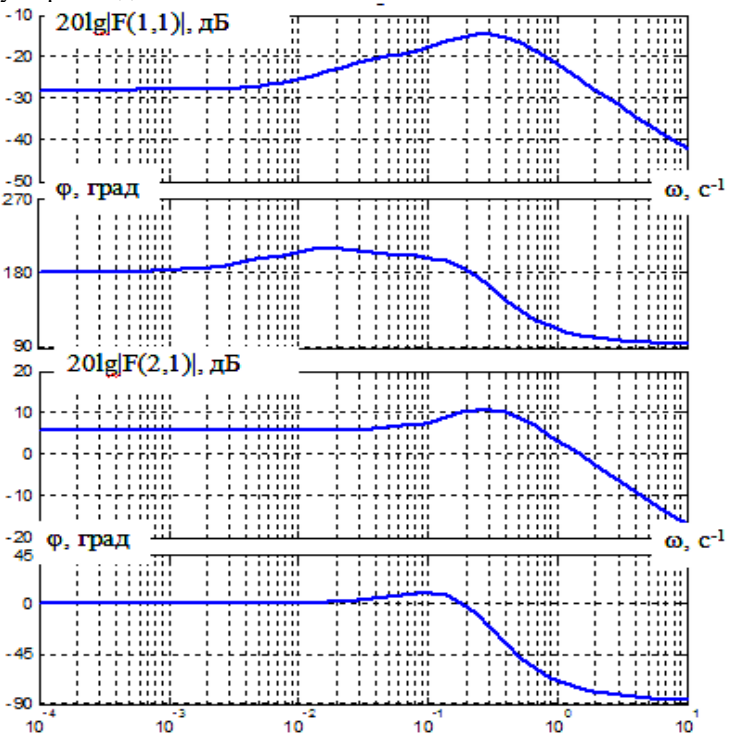


Рис. 2. Логарифмічні характеристики спостерігача при оптимальних значеннях γ_1=0,4 та γ_2=0,01

В результаті застосування розробленої технології і відповідного програмно-технічного комплексу була синтезована система спостереження з оптимальною структурою і параметрами. Абсолютна погрішність вимірювання вихідних сигналів ЗКШ складає 6,7 мм по висоті та 1,14% по вологості.

Наступним кроком у вирішенні задачі максимізації швидкості сушіння в ЗКШ каскадного типу відповідно до етапів дослідження, представлених на рис. 1.6, є визначення структури і параметрів оптимального регулятора на основі знайдених вже у попередніх розділах матриць передаточних функція об'єкта F_{11} вираз (3.21), та системи спостереження F, що описується матрицею (3.66).

Для розв'язання поставленої задачі необхідно:

– довести можливість застосування розробленої в другому розділі технології компенсації чистих запізнювань в каналах керування ЗКШ на базі випереджувача Сміта ;

– визначити структуру і параметри оптимального багатовимірного регулятора;

– дослідити вплив зміни обмеження дисперсії вхідних сигналів ЗКШ на структуру і параметри МПФ оптимального регулятора;

– визначити матрицю С, яка характеризує оптимальне співвідношення між сумою дисперсій сигналів керування та сумою дисперсій відхилень висоти киплячого шару та вологості насіння від заданих значень.

Так як зерносушарка з киплячим шаром каскадного типу являє собою багатовимірний об'єкт з розподіленими параметрами із запізненням, то наступним кроком на шляху синтезу оптимальної САК є компенсація всіх наявних запізнень в структурі МПФ ЗКШ.

2. Компенсація запізнень зерносушарки з киплячим шаром каскадного типу для сушіння насіння соняшника

Оскільки МПФ системи спостереження, що була визначена в попередньому розділі для сьомого каскаду на основі датчика вологості ємнісного типу (15), описується виразом МПФ ЗКШ, яка відповідає цьому каскаду згідно даних табл. 3, наступна

$$F_{11}=\begin{bmatrix} 0.5137e-05\dfrac{s+0.09}{s+0.026}e^{-\tau_1 s} & 0 \\ 0.6441e-02\dfrac{s-0.07}{s+0.01}e^{-\tau_2 s} & 0.1795\dfrac{s+0.07}{s+0.01}e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix}, \qquad (25)$$

де $\tau_{1\text{-}3}$ – запізнення в каналах керування ($\tau_1=\tau_{S_h h}$; $\tau_{2=}\tau_{S_h \mathrm{w}}$; $\tau_3=\tau_{T\mathrm{w}}$),

то задача компенсації запізнень ЗКШ полягає у тому, щоб за відомими МПФ об'єкта (16), спостерігача (17) з системою вимірювання (18) знайти таку структуру і параметри МПФ випереджувача Сміта $\mathbf{S_m}$, паралельне з'єднання якого до послідовно з'єднаних об'єкта, датчика вологості, спостерігача дасть еквівалентну ланку W_e, що вже не містить запізнень.

Для вирішення поставленої задачі застосуємо методику, згідно якої виконано підстановку виразів (16), (17) та (181) до формули (20), в результаті чого здобуто матрицю $W_{CИСТ}$:

$$W_{CИСТ}=\begin{bmatrix} \dfrac{-3.1502e-08(s-0.07)}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)}e^{-\tau_2 s} & \dfrac{-8.781e-07(s+0.07)}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)}e^{-\tau_3 s} \\ \dfrac{0.00058455(s-0.07)}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)}e^{-\tau_2 s} & \dfrac{0.016294(s+0.07)}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)}e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix}. \qquad (26)$$

Представимо матрицю (26) відповідно до правої частини виразу (2.43), тобто винесемо з $W_{СИСТ}$ полюса ліворуч і отримаємо, що

$$P_{СИСТ}^{-1} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)} \end{bmatrix}; \quad (27)$$

$$M_{СИСТ} = \begin{bmatrix} -0.0031502(s-0.07)e^{-\tau_2 s} & -0.0008781(s+0.07)e^{-\tau_3 s} \\ 0.058455(s-0.07)e^{-\tau_2 s} & 0.016294(s+0.07)e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Вираз (28) не містить в своїй структурі запізнення $\boldsymbol{\tau_1}$, тому матрицю $M_{СИСТ}$ можна представити у вигляді суми двох складових:

$$M_{СИСТ} = \begin{bmatrix} -3.1502e-008(s-0.07)e^{-\tau_2 s} & 0 \\ 0.00058455(s-0.07)e^{-\tau_2 s} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -8.781e-007(s+0.07)e^{-\tau_3 s} \\ 0 & 0.016294(s+0.07)e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$M_2 e^{-\tau_2 s} = \begin{bmatrix} -3.1502e-008(s-0.07)e^{-\tau_2 s} & 0 \\ 0.00058455(s-0.07)e^{-\tau_2 s} & 0 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$M_3 e^{-\tau_3 s} = \begin{bmatrix} 0 & -8.781e-007(s+0.07)e^{-\tau_3 s} \\ 0 & 0.016294(s+0.07)e^{-\tau_3 s} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Тоді, відповідно до методики

$$P_{СИСТ}^{-1} M_2 e^{-\tau_2 s} = \begin{bmatrix} \dfrac{-3.1502e-008(s-0.07)}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)} & 0 \\ \dfrac{0.00058455(s-0.07)}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)} & 0 \end{bmatrix} e^{-\tau_2 s}; \quad (32)$$

$$P_{СИСТ}^{-1} M_3 e^{-\tau_3 s} = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{-8.781e-007(s+0.07)}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)} \\ 0 & \dfrac{0.016294(s+0.07)}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)} \end{bmatrix} e^{-\tau_3 s}. \quad (33)$$

Методика визначення структури і параметрів МПФ компенсатора $\mathbf{S_m}$ передбачає опис динаміки $W_{СИСТ}$ у вигляді рівняння стану (РС). Тому виконаємо перехід від отриманих вище матриць (32) і (33) до простору станів, скориставшись вбудованою в Matlab функцією «ss». В результаті переходу знайдено ряд моделей у просторі станів. Для добутку $P_{СИСТ}^{-1} M_2$ –

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.0260 & 0.3098 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2270 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0437 & -0.2270 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0100 & 0.2828 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.2270 & 1.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0437 & -0.2270 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.002 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0.0000 & -0.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0008 & 0.0030 & 0 \end{bmatrix}; \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (34)$$

для добутку $P_{СИСТ}^{-1} M_3$ –

$$A_3 = \begin{bmatrix} -0.0260 & 0.2098 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2270 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0437 & -0.2270 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0100 & 0.2449 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.2270 & 1.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0437 & -0.2270 \end{bmatrix}; \quad B_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.0010 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.1250 \end{bmatrix};$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} -0.0002 & -0.0009 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0319 & 0.1304 & 0 \end{bmatrix}; \quad D_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Тоді, відповідно до виразу методики МПФ випереджувача Сміта S_m має наступну структуру:

$$Sm = \begin{bmatrix} \frac{-3.1502e-08(s-0.07)}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)}(1-e^{-\tau_2 s}) & \frac{-8.781e-07(s+0.07)}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)}(1-e^{-\tau_3 s}) \\ \frac{0.00058455(s-0.07)}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)}(1-e^{-\tau_2 s}) & \frac{0.016294(s+0.07)}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)}(1-e^{-\tau_3 s}) \end{bmatrix}. \quad (38)$$

Якщо ж приєднати компенсатор S_m із структурою і параметрами, що відповідають виразу (38) до системи (18) так, як це показано на рис. 2, то згідно правила отримаємо еквівалентну систему W_e, що вже не вміщує жодних запізнень

$$W_e = \begin{bmatrix} \frac{-3.1502e-08(s-0.07)}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)} & \frac{-8.781e-07(s+0.07)}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)} \\ \frac{0.00058455(s-0.07)}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)} & \frac{0.016294(s+0.07)}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)} \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Як видно з рівняння (39), при паралельному з'єднанні випереджувача Сміта до об'єкта керування, датчика і системи спостереження, що з'єднані послідовно, запізнення в системі компенсуються. Компенсація запізнень в структурі МПФ ЗКШ дозволила перейти до наступного етапу роботи – синтезу оптимального багатовимірного регулятора.

3. Синтез оптимальної структури регулятора автоматизованої системи регулювання технологічними параметрами сушіння насіння соняшника

У попередньому пункті роботи доведено, що застосування випереджувача Сміта S_m з МПФ виду (18) дозволяє компенсувати наявні запізнення в структурі ЗКШ, модель динаміки якої описується виразом (20). В результаті паралельного з'єднання випереджувала з об'єктом керування отримана МПФ еквівалентної системи W_e (39).

Якщо представити матрицю (4.15) у вигляді $W_e = P_e^{-1} M_e$, тоді

$$P_e^{-1} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{(s+0.01)(s^2+0.454s+0.09519)} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

$$M_e = \begin{bmatrix} -3.1502e-08(s-0.07) & -8.781e-07(s+0.07) \\ 0.00058455(s-0.07) & 0.016294(s+0.07) \end{bmatrix}, \quad (41)$$

а у зворотному зв'язку підключити регулятор з МПФ $W_{PEГ}$ так, як це показано на рис. 2, то задачу синтезу оптимального регулятора можна сформулювати наступним чином. За відомими матрицями M_e, P_e^{-1}, та одиничними матрицями K_e та F_e потрібно визначити таку структуру і параметри оптимального регулятора $W_{PEГ}$, що забезпечує стійкість замкнутої системи та доставляє мінімум критерію якості.

Відповідно до методики розв'язок поставленої задачі вимагає визначити нові транспоновані матриці спектральних щільностей еквівалентних збурень $S'_{\psi_n\psi_n}$, шумів вимірювання $S'_{\varphi_n\varphi_n}$ та взаємних спектральних щільностей $S'_{\xi\psi}$. Застосування правил знаходження зазначених транспонованих матриць вимагає знайти добуток дробово-раціональних матриць F_e, K_e, P_e^{-1}

$$F_e K_e P_e^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & \dfrac{1}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)} \\ 0 & \dfrac{1}{(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519)} \end{bmatrix} \quad (42)$$

та представити знайдену дробово-раціональну матрицю (42) відповідно до формули винесення полюсів як

$$F_e K_e P_e^{-1} = P_{0e}^{-1} N. \quad (43)$$

Звідси $P_{0e}^{-1} = P_e^{-1}$, а матриця N має вид

$$N = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \qquad (44)$$

Визначення матриць спектральних щільностей $S'_{\psi_n\psi_n}$, $S'_{\varphi_n\varphi_n}$ з урахуванням виразу (44) виконано згідно правил та отримано наступні результати

$$S'_{\psi_n\psi_n} = \begin{bmatrix} 235{,}2 & -111{,}7 \\ -111{,}7 & 53{,}11 \end{bmatrix}, \qquad (45)$$

$$S'_{\varphi_n\varphi_n} = \frac{1.5^2}{3\pi} = 0.07958, \qquad (46)$$

$$S'_{\xi\psi} = \begin{bmatrix} -0{,}0075106 & 0{,}13937 \\ 0{,}0035921 & -0{,}066655 \end{bmatrix}. \qquad (47)$$

Вихідну матрицю $S'_{\xi\xi}$ для факторизації сформовано відповідно до формули методики у вигляді:

$$S'_{\xi\xi} = \left|s^2 + 0.2476s + 0.02278\right|^2 \begin{bmatrix} 0{,}0005467 & -0.0080582 \\ -0.0080582 & 0.18824 \end{bmatrix}. \qquad (48)$$

Тоді матриця D як результат факторизації попередньої матриці має вид

$$D = \begin{bmatrix} 0.023382(s^2 + 0.2476s + 0.02278) & 0 \\ -0.34464(s^2 + 0.2476s + 0.02278) & 0.26357(s^2 + 0.2476s + 0.02278) \end{bmatrix}. \qquad (49)$$

Наступним кроком синтезу регулятора є формування матриці GG_* згідно правила методики.

Якщо обмеження на сигнали керування зерносушаркою описуються одиничною діагональною матрицею С

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad (50)$$

тоді після поетапного виконання дій, передбачених співвідношенням, отримано

$$G.G = \frac{1}{g \cdot g_*} \begin{bmatrix} -\left|(s+0.06984)(s^2+0.3315s+0.04662)\right|^2 & -0.00060256(s+0.07)^2 \\ 0.00060256(s+0.07)^2 & -\left|(s+0.06729)(s^2+0.21s+0.01356)\right|^2 \end{bmatrix}, \qquad (51)$$

де $g = (s + 0.07615)(s + 0.125)(s + 0.01)$.

В результаті факторизації виразу (51) знайдено матрицю G

$$G = \frac{1}{g} \begin{bmatrix} (s+0.06729)(s^2+0.209s+0.01349) & 0.016832(s-0.0798)(s+0.06694) \\ 0.16832(s^2+0.6306s+0.1934) & (s+0.0006726)(s^2+0.3408s+0.04745) \end{bmatrix}. \qquad (52)$$

Тоді

$$G^{-1} = \frac{1}{d}\begin{bmatrix} (s+0.06729)(s^2+0.209s+0.01349) & 0.016832(s-0.0798)(s+0.06694) \\ 0.16832(s^2+0.6306s+0.1934) & (s+0.0006726)(s^2+0.3408s+0.04745) \end{bmatrix}, \quad (53)$$

де знаменник $d = (s+0.06986)(s^2+0.3368\,s+0.04839)$.

Після формування матриці відповідно до співвідношення і її сепарації була отримана наступна структура:

$$(T_0 + T_+) = \frac{1}{t_0}\begin{bmatrix} -0.0066744(s+0.03932) & 0.0022597(s+0.03982) \\ -0.76438(s+0.02959) & 0.025879(s+0.02959) \end{bmatrix}, \quad (54)$$

де

$$t_0 = (s+0.026)(s+0.01). \quad (55)$$

матрицю F_U визначено в результаті підстановки співвідношень (49), (53) та (54) до виразу методики:

$$F_U = \frac{1}{(s+3.114)}\cdot\begin{bmatrix} -2.374e06(s+0.01105) & -3.8319e05(s+0.01105) \\ 1.1046e05(s+0.5281) & 1783(s+0.5281) \end{bmatrix}, \quad (56)$$

Згідно методики необхідно визначити на основі матриці F_U структуру і параметри матриці передаточних функцій Fx. Для цього було використано вираз методики, в результаті чого

$$F_x = \frac{1}{(s+3.114)}\begin{bmatrix} \dfrac{0.0055098(s+0.01)}{(s+0.026)(s^2+0.4551s+0.09571)} & \dfrac{0.00088934(s+0.009995)}{(s+0.026)} \\ \dfrac{-102.24}{(s^2+0.4551s+0.09571)} & \dfrac{-16.503}{(s^2+0.4551s+0.09571)} \end{bmatrix}, \quad (57)$$

Обертання цієї матриці дозволило визначити, що

$$F_X^{-1} = \frac{1}{f_X^{-1}}\begin{bmatrix} F_X^{-1}(1,1) & F_X^{-1}(1,2) \\ F_X^{-1}(2,1) & F_X^{-1}(2,2) \end{bmatrix}, \quad (58)$$

де

$$f_X^{-1} = (s+1.206)(s+0.75), \quad (59)$$

$$F_X^{-1}(1,1) = -181.499(s+3.114)(s+0.026)(s^2+0.4551s+0.09571);$$

$$F_X^{-1}(1,2) = \frac{-0.0097809(s+3.114)(s+0.01084)(s^2+0.4551s+0.09571)^2}{(s+0.01043)};$$

$$F_X^{-1}(2,1) = \frac{1124.4294(s+3.114)(s+0.026)(s^2+0.4551s+0.09571)}{(s+0.01)}; \quad (60)$$

$$F_X^{-1}(2,2) = 0.060596(s+3.114)(s^2+0.4551s+0.09571).$$

Підстановка матриць (56) та (57) дозволила знайти МПФ оптимального регулятора $W_{PEГ}$

$$W_{PEГ} = \frac{1}{(s+0.01083)}\begin{bmatrix} W_{PEГ}(1,1) & W_{PEГ}(1,2) \\ W_{PEГ}(2,1) & W_{PEГ}(2,2) \end{bmatrix}, \quad (61)$$

де

$$
\begin{aligned}
W_{PEГ}(1,1) &= -368570000(s+0.026)(s+0.01107)(s^2+0.454s+0.09519);\\
W_{PEГ}(1,2) &= 3357.2(s+0.01246)(s+0.01112)(s^2+0.454s+0.09519);\\
W_{PEГ}(2,1) &= 17150000(s+0.5277)(s+0.026)(s^2+0.454s+0.09519);\\
W_{PEГ}(2,2) &= -156.21(s+0.5304)(s+0.01284)(s^2+0.454s+0.09519);
\end{aligned}
\quad . (62)
$$

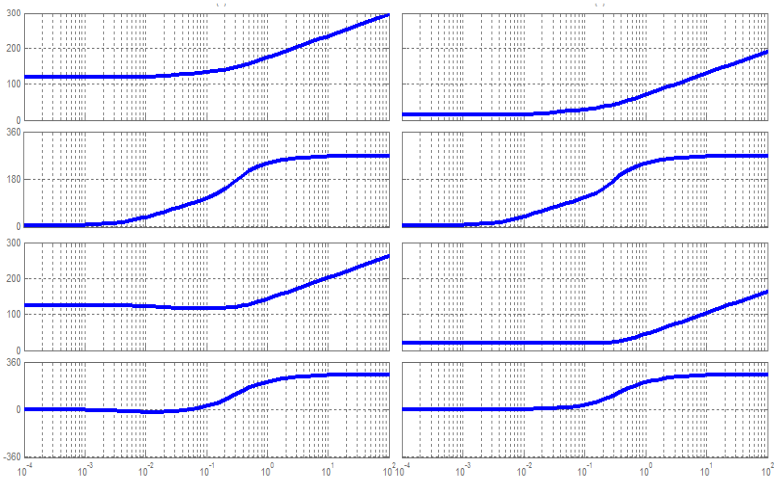


Рис. 4 Частотні характеристики МПФ регулятора при $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

Як видно із виразу (62) степені елементів чисельника більше, ніж степені знаменника, що підтверджується кінцевим нахилом графіків в області високих частот. Аналіз графіків ЛАЧХ та ЛФЧХ оптимального регулятора (4) вказує на те, що регулятор є багатовимірним підсилювачем верхніх частот.

У наступній частині монографії виконано дослідження зміни структури і параметрів МПФ оптимального регулятора при різних значеннях матриці С, що характеризує зміну обмеження на управляючі дії, в результаті чого було обрано оптимальне співвідношення потужності в керуванні, при якому гарантується максимальне зняття вологи за одиницю часу за рахунок мінімізації дисперсії відхилення висоти киплячого шару від його середнього значення.

4. Дослідження впливу обмеження в регулюванні на структуру і параметри матриці передаточних функцій оптимального регулятора

Задача дослідження впливу обмеження в керуванні на структуру і параметри МПФ оптимального регулятора формулюється наступним чином. Змінюючи обмеження на вектор вхідних сигналів у вигляді матриці $C = diag2(10^n)$, де $n \in [-4,-3...2]$ і використовуючи методику, потрібно знайти структури і параметри МПФ оптимальних регуляторів, дослідити характер їх зміни та визначити таке співвідношення між потужністю керування і дисперсією висоти киплячого шару, при якому досягається мінімальне значення обраного критерію якості стабілізації.

Для вирішення поставленої задачі було виконано всі необхідні етапи технології для різних значень матриці С, в результаті чого отримана множина МПФ багатовимірних регуляторів, структура яких представляється виразом

$$W_{PEГ} = \frac{(s^2 + 0.454s + 0.09519)}{(s + 0.01083)} \begin{bmatrix} k_{11}(s+a_1)(s+a_2) & k_{12}(s+g_1)(s+g_2) \\ k_{21}(s+b_1)(s+b_2) & k_{22}(s+p_1)(s+p_2) \end{bmatrix}, \quad (63)$$

де $k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}$ – передаточні коефіцієнти елементів МПФ регулятора, $a_1, a_2, b_1, b_2, g_1, g_2, p_1, p_2$ – частоти.

Визначена рівнянням (63) структура матриці передаточних функцій регулятора залишається постійною при зміні n у широких межах, а її параметри змінюються за законами, визначеними у табл. 5.

Апроксимація зміни коефіцієнтів МПФ (63) при $n \in [-4,-3...2]$ показала, що всі вони змінюються за спадаючою експоненціальною функцією.

За графіками можна побачити, що коефіцієнти МПФ практично не відрізняються один від одного при зміні елементів $n \geq -1$. Однак, при зміні обмеження в бік $n \leq -1$ спостерігається значна відмінність графіків.

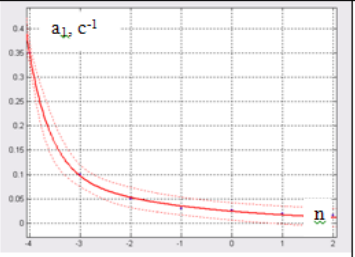
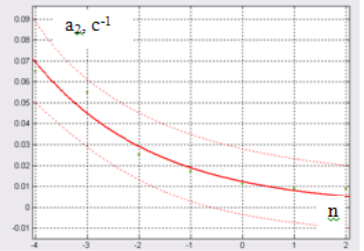
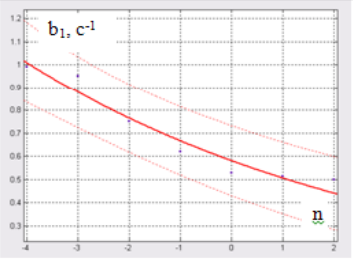
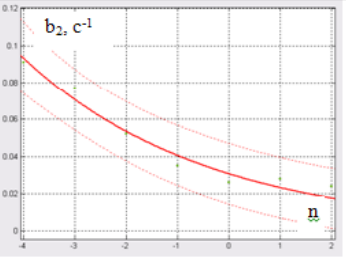
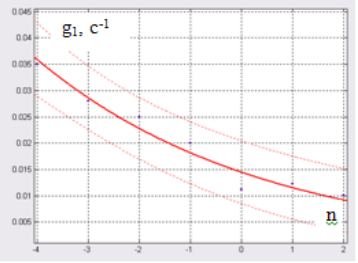
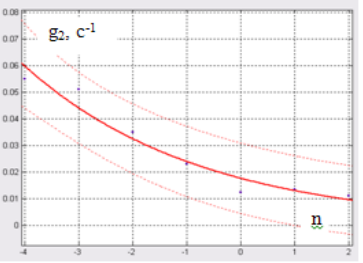
Отримана таким чином структура МПФ регуляторів і встановлені закони зміни її параметрів (номограми) можуть в подальшому бути використанні для впровадження програмного забезпечення і прорахунку зміни коефіцієнтів регулятора в досить широких межах, що дозволить значно скоротити час на синтез регулятора і виключить необхідність кожного разу застосовувати складні громіздкі розрахунки.

Частотні характеристики розрахованих регуляторів для наведених випадків показані на рис. 4. Аналіз отриманих графіків показує, що всі регулятори мають ідентичні частотні характеристики, що підтверджується загальною структурою їх МПФ у вигляді (63).

Таблиця 5

Зміна параметрів МПФ регулятора при різних значеннях матриці $C = diag2(10^n)$

	n k_{11} **x10⁶** м/м	k_{12} **x10³** °C/м	k_{21} **x10⁷** м/%	k_{22} **x10³** °C/%	a_1, c^{-1}	a_2, c^{-1}	b_1, c^{-1}	b_2, c^{-1}	g_1, c^{-1}	g_2, c^{-1}	p_1, c^{-1}	p_2, c^{-1}
-4	1,157	8,005	101,2	0,2108	0,35	0,065	0,99	0,091	0,035	0,055	0,98	0,065
-3	1,5375	7,100	21,12	0,1981	0,1	0,055	0,95	0,077	0,028	0,051	0,85	0,057
-2	1,8841	5,320	8,01	0,3185	0,05	0,025	0,75	0,052	0,025	0,035	0,78	0,031
-1	51,046	4,510	5,012	0,165	0,03	0,017	0,62	0,035	0,02	0,023	0,65	0,025
0	352,6	3,345	1,6389	0,156	0,026	0,011	0,5277	0,026	0,011	0,0125	0,53	0,013
1	512,37	3,395	1,3041	0,1612	0,020	0,009	0,515	0,028	0,012	0,0135	0,62	0,011
2	961,22	3,301	1,01	0,152	0,016	0,0087	0,5	0,024	0,01	0,0112	0,53	0,015

Графік	Графік
	
$a_1(n) = 2.55e^{-2.3n} - 0.024e^{-0.37n}$	$a_2(n) = 0.012e^{-0.44n}$
	
$b_1(n) = 0.5808e^{-0.14n}$	$b_2(n) = 0.031e^{-0.28n}$
	
$g_1(n) = 0.015e^{-0.23n}$	$g_2(n) = 0.0185e^{-0.31n}$

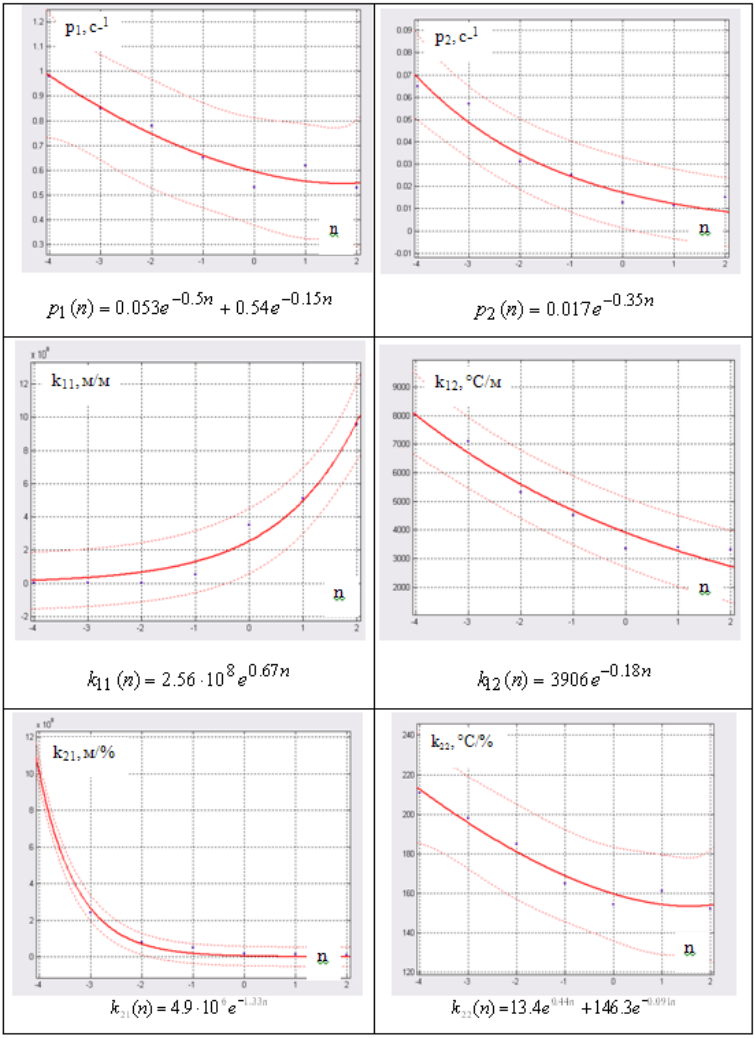


Рис. 3. Апроксимація зміни параметрів МПФ оптимального регулятора

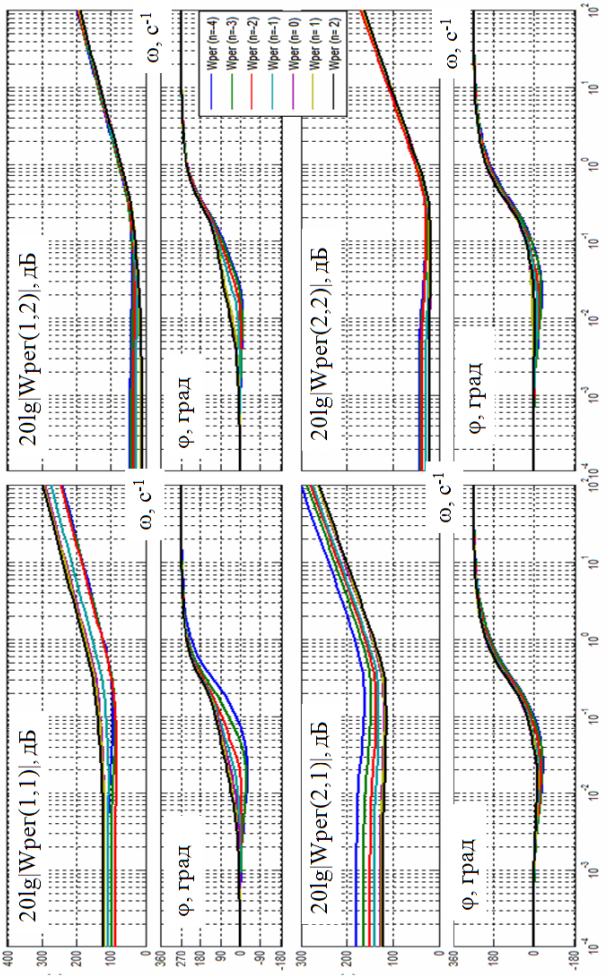


Рис. 4. Ідентичність частотних характеристик регуляторів при різних значеннях матриці C

Для встановлення діапазону значень зміни дисперсії сигналів керування, при якому дотримується баланс між потужністю керування і швидкістю сушіння, застосуємо вираз (63), в результаті якого було знайдено критерій якості *e*.

Графічно це можна зобразити так, як це показано на рис. 5.

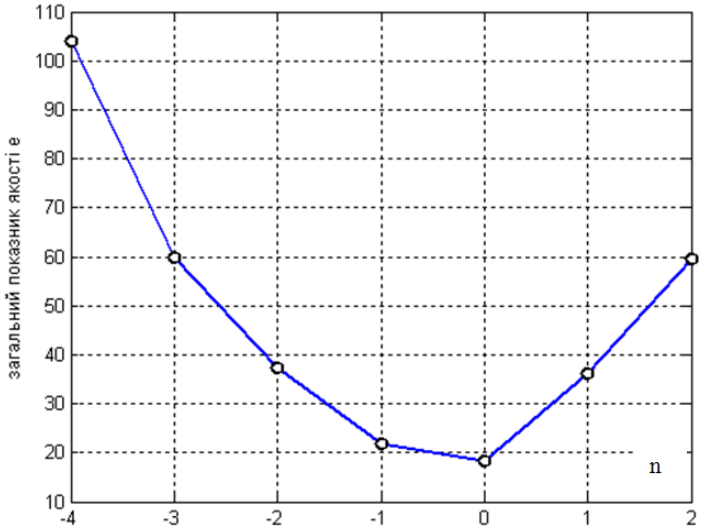


Рис. 5. Залежність загального показника якості *e* при зміні показника n

Як видно з графіка, екстремум кривої знаходиться в діапазоні зміни елементів матриці $[10^{-1}\ldots10^{1}]$, а саме при значенні $C=10^{0}E_2$

Отже, структура регулятора, при якому досягається оптимальний компроміс між потужністю керування і точністю підтримки висоти киплячого шару, має вид

$$W=\frac{(s^2+0.454s+0.09519)}{(s+0.01083)}\begin{bmatrix}-368{,}57\cdot10^{6}(s+0.026)(s+0.01107) & 3357{,}2(s+0.01246)\\ 17{,}15\cdot10^{6}(s+0.5277)(s+0.026) & -156.21(s+0.5304)(s+0.01284)\end{bmatrix}. \quad (64)$$

Таблиця 6

Загальний показник якості e для різних значень матриці C

e	C	$\begin{bmatrix}10^{-1} & 0\\ 0 & 10^{-1}\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}10^{-1} & 0\\ 0 & 10^{0}\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}10^{-1} & 0\\ 0 & 10^{-2}\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}10^{-1} & 0\\ 0 & 10^{1}\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}10^{1} & 0\\ 0 & 10^{0}\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}10^{1} & 0\\ 0 & 10^{1}\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}10^{2} & 0\\ 0 & 10^{1}\end{bmatrix}$
e_x	мм / %	$\begin{bmatrix}3{,}7 & 0\\ 0 & 2{,}91\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}33{,}4 & 0\\ 0 & 10{,}7\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}20{,}1 & 0\\ 0 & 8{,}1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}5{,}51 & 0\\ 0 & 3{,}31\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}8{,}7 & 0\\ 0 & 4{,}3\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}4{,}02 & 0\\ 0 & 3{,}02\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}4 & 0\\ 0 & 2{,}93\end{bmatrix}$
$e_x\cdot R$		$\begin{bmatrix}5{,}892 & 0\\ 0 & 1{,}827\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}53{,}19 & 0\\ 0 & 6{,}72\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}32{,}01 & 0\\ 0 & 5{,}087\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}8{,}774 & 0\\ 0 & 2{,}079\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}13{,}85 & 0\\ 0 & 2{,}7\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}6{,}401 & 0\\ 0 & 1{,}897\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}6{,}37 & 0\\ 0 & 1{,}84\end{bmatrix}$
e_u	см / °C	$\begin{bmatrix}0{,}0023 & 0\\ 0 & 0{,}9596\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}75{,}77 & 0\\ 0 & 773{,}58\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}13{,}2 & 0\\ 0 & 289{,}45\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}2{,}2779 & 0\\ 0 & 108{,}613\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}2{,}2989 & 0\\ 0 & 160{,}79\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0{,}0069 & 0\\ 0 & 27{,}75\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0{,}0058 & 0\\ 0 & 5{,}14\end{bmatrix}$
$e_u\cdot C$		$\begin{bmatrix}0{,}2286 & 0\\ 0 & 95{,}96\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0{,}00757 & 0\\ 0 & 0{,}07736\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0{,}01321 & 0\\ 0 & 0{,}2892\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0{,}2278 & 0\\ 0 & 10{,}8613\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0{,}02989 & 0\\ 0 & 1{,}608\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0{,}006921 & 0\\ 0 & 27{,}75\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0{,}05787 & 0\\ 0 & 51{,}39\end{bmatrix}$
e		103.9076	59.9949	37.3794	21.9421	**18.1879**	36.0542	59.6579

ВИСНОВКИ

В монографії було доведено, що:

1. Компенсувати наявні запізнення в зерносушарці з киплячим шаром каскадного типу можна за рахунок застосування випереджувача Сміта, якщо приєднати його паралельно до послідовно з'єднаних об'єкта керування та оптимального спостерігача.

2. Компенсація запізнень випереджувачем Сміта не впливає на динаміку збурень і завад, що діють на сушарку в реальних експлуатаційних умовах.

3. Структура МПФ оптимального регулятора залишається однаковою при зміні обмежуючих факторів у вигляді матриці С, а змінюються лише її параметри.

4. Зміна частотних характеристик оптимального регулятора дозволяє досягти компромісу між точністю стабілізації висоти киплячого шару та зваженою сумою дисперсій зміни положення шиберу та зміни температури теплоносія відносно заданих значень.

5. Оптимальне значення обмеження на дисперсії зміни положення шиберу та зміни температури теплоносія відносно заданих значень, при якому досягається компроміс між потужністю вхідних сигналів ЗКШ і ефективністю сушіння є C=diag2(1,1).

АНОТАЦІЯ

У роботі в результаті виконання розроблених раніше технологій доведено, що зерносушарка для насіння соняшника з киплячим шаром є складним багатовимірним об'єктом з розподіленими параметрами та чистим запізненням, величина якого залежить від відстані каскаду сушарки від завантажувального шиберу.

В усталеному режимі модель динаміки такого складного об'єкта керування може бути представлена у вигляді множини матриць передаточних функцій. Структура кожної з матриць залишається однаковою, а параметри – змінюються в залежності від розміщення каскаду відносно шиберу завантаження.

Збурення, що діють на каскадах ЗКШ в реальних експлуатаційних умовах, доцільно вважати двовимірними стаціонарними випадковими процесами типу «білий шум», інтенсивність яких змінюється по мірі віддалення від шиберу завантаження.

Також було встановлено, що зміни висот киплячого шару на кожному з каскадів пов'язані між собою, тобто, знаючи висоту киплячого шару на одному з каскадів, можна визначити її на будь-якому іншому.

В результаті структурної ідентифікації доведено, що існує перехресний зв'язок між зміною висоти киплячого шару на каскаді з номером k і кінцевою вологістю матеріалу на виході із сушарки. Це

дозволило синтезувати матрицю передаточних функцій оптимального спостерігача, який оцінює зміну висоти киплячого шару на будь-якому каскаді за сигналом про зміну вологості насіння на виході ЗКШ з мінімальною дисперсією похибки.

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 зерносушильної 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. 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. Обгрунтування 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., Kozlovskyi, O., Rendzinyak, S., Fedotova, M., Korud, V. Automated System for Measuring the Temperature of the Desiccator Proceedings of 2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2020, 2020, 9238716 Conference Paper.
11. 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]

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]

13. Монографія/ Федотова М.О., Скриннік І.О., Дарієнко В.В. Автоматизація процесу сушіння дисперсного матеріалу в киплячому шарі Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2022. 554 p. [http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/217/5995/12512-1]

14. Монографія/ Kondratets V.O., Matsui A.M., Fedotova M.O., Shepel A.S., Orlenko V.O. Methods of recognition in the methodology of energy-effective invariatiant control of crushing-claccification of ore during enrichment – Petroșani, Румунія : UNIVERSITAS Publishing, 2023. – 696 p.. p. 343-373 https://ep3.nuwm.edu.ua/26019/]

Information about the authors:
Fedotova Marianna Oleksandrivna,
Candidate of Technical Sciences,
Assistant at the Department of Automation of Production Processes,
Central Ukrainian National Technical University
8, University ave., Kropyvnytskyi, 25000, Ukraine

Didyk Oleksandr Kostiantynovych,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Automation of Production Processes,
Central Ukrainian National Technical University
8, University ave., Kropyvnytskyi, 25000, Ukraine

Zavoruyev Roman Serhiiovych,
Postgraduate student at the Department of Automation
of Production Processes,
Central Ukrainian National Technical University
8, University ave., Kropyvnytskyi, 25000, Ukraine