

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ЗАХАРЧЕНКО РУСЛАН ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 681.51:631.365:633.1

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ  
СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР**

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Кропивницький 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Сільвестров Антон Миколайович**,  
Національний технічний університет  
України “Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського”

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Дубовой Володимир Михайлович**,  
Вінницький національний технічний  
університет, завідувач кафедри  
комп’ютерних систем управління;

кандидат технічних наук, доцент  
**Зозуля Валерій Анатолійович**,  
Центральноукраїнський національний  
технічний університет, доцент кафедри  
автоматизації виробничих процесів.

Захист відбудеться 04 жовтня 2019 року о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 23.073.02 в Центральноукраїнському національному технічному університеті за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий 03 вересня 2019 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент



О.К. Дідик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Аграрний сектор економіки, важливою складовою якого є сільське фермерське господарство, формує продовольчу, а у визначених межах і економічну, екологічну та енергетичну безпеку. Він забезпечує розвиток технологічно пов'язаних галузей національної економіки та створення соціально-економічних умов для розвитку. Агропромисловий комплекс складає близько 12% валової доданої вартості України, є одним з основних бюджетоформуючих секторів національної економіки. За період з 2007 по 2018 рік виробництво продукції в сільськогосподарських підприємствах зросло майже у два рази. При цьому половина валової продукції виробляється в особистих селянських господарствах, де гостро постає проблема обробки і зберігання врожаю. Оскільки сире зерно не може зберігатися довгий час, його потрібно просушити. Однак, малі селянські господарства не мають необхідних технічних засобів для цього. Тому актуальною є розробка недорогих малопотужних зерносушарок з автоматизованим і оптимізованим процесом сушіння зерна.

Внаслідок незавершеності процесів адаптації до європейських вимог щодо якості та безпечності харчових продуктів, нестійкості торговельних відносин з державами-імпортерами, конкурентні позиції вітчизняної сільськогосподарської продукції на зовнішньому ринку не є стабільними. Тому в межах малих фермерських господарств важливо розвивати власні засоби збереження і переробки сировини та виготовлення вторинної продукції. Це вимагає модернізації технічної бази, автоматизації і оптимізації технологічних процесів сушіння зерна.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконано в рамках держбюджетної теми “Науково-дослідницька робота 2908-П номер державної реєстрації 1116U003716 “Методи та засоби структурно-параметричної ідентифікації електротехнічних систем” та відповідно до напрямку наукової діяльності кафедри автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка “Автоматизація технологічних процесів на базі ідентифікації нечітких регуляторів і розпізнавання образів”.

**Мета роботи** полягає у підвищенні ефективності процесу обробки і збереження зернових культур шляхом розроблення оптимальної адаптивної системи керування процесом сушіння зернових культур з ідентифікатором і еталонною моделлю.

**Об'єктом дослідження** є процес керування гранично допустимою температурою та необхідною вологістю зерна в процесі його сушіння.

**Предметом дослідження** є адаптивні автономні системи керування процесом сушіння зерна з оптимальним ідентифікатором та еталонною моделлю.

**Задачі дослідження.** Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Провести аналіз властивостей зерна як об'єкта сушіння та методів і режимів процесу сушіння.

2. Провести дослідження математичної моделі процесів зерносушарки, як об'єкта з розподіленими параметрами та перейти до еквівалентної системи з зосередженими параметрами.

3. Розробити структуру і алгоритм функціонування багатомірної автономної САК з еталонною моделлю та ідентифікатором, котра з необхідною якістю відпрацьовує завдання процесу сушіння зерна.

4. Розробити підсистему ідентифікації для відслідковування зміни параметрів сушарки, як об'єкта керування, що дозволить створити функціонально надійну САК в умовах нестаціонарності і стохастичності характеристик об'єкта керування та внутрішнього і зовнішнього середовища.

5. Отримати незміщені і ефективні оцінки параметрів передаточних функцій окремих каналів сушарки з метою реалізації оптимального адаптивного алгоритму автономного керування окремими каналами температури і вологості сушарки як багатомірного об'єкта з перехресними зв'язками.

**Методи дослідження.** В якості теоретичної бази, у процесі досліджень, використано класичні і сучасні методи теорії автоматичного керування, математичний аналіз, теорію систем із зосередженими і розподіленими параметрами, методи комп'ютерного моделювання складних багатомірних динамічних систем. Як експериментальну базу використано теорію планування і оптимальної обробки даних натурального експерименту, сучасну теорію ідентифікації та математичної статистики.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Набула подальшого розвитку математична модель процесу сушіння з розподіленими і зосередженими, відносно вимірювальної системи, параметрами.

2. Вперше розроблено автономну адаптивну систему керування процесом сушіння зернових культур, яка забезпечує оптимальні режими в умовах невизначеності та нестаціонарності параметрів об'єкта і середовища.

3. Вперше отримано незміщені та ефективні оцінки параметрів передавальних функцій об'єкта керування завдяки застосуванню методів конфлюентного аналізу в умовах зашумленості вхідних і вихідних сигналів.

4. Вперше побудовано спрощену систему автономного керування каналами температури та вологості зерна, яка з необхідною точністю забезпечує процес сушіння, завдяки незміщеності та ефективності отриманих оцінок параметрів об'єкта та методів редукції складних передавальних функцій.

5. Вперше побудовано функціонально надійну адаптивну систему стабілізації оптимальних значень температури і вологості зерна в умовах неконтрольованих параметричних і сигнальних збурень завдяки ідентифікації і розв'язці каналів керування.

#### **Практична цінність роботи** полягає в наступному:

1. Завдяки оптимальній конструкції та досконалості системи керування створено умови для широкого використання подібних систем в малих фермерських господарствах, що допоможе вирішити логістичну проблему транспортування зерна від виробника до споживача.

2. За рахунок впровадження адаптивної системи керування процесом зерносушіння отримано функціонально надійну систему стабілізації оптимальних значень температури і вологості зерна.

3. За рахунок використання сучасної цифрової техніки удосконалено систему керування.

4. Проведені експериментальні дослідження дають можливість за допомогою незначних капіталовкладень забезпечити роботу промислового сушильного агрегата з високими показниками якості. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої системи автоматичного керування процесом сушіння зернових культур складає 561,7 тис. грн.

5. Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено у виробничий процес ТОВ “Шишацький комбикормовий завод”, що підтверджено відповідним актом реалізації від 23.01.2019р. Основні наукові та практичні результати впроваджені у навчальний процес на кафедрі автоматики і електроприводу Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка в рамках викладання дисциплін «Теорія автоматичного керування», «Моделювання електромеханічних систем», «Основи автоматизованого проектування електротехнічних пристроїв та електромеханічних систем» та Полтавському коледжі харчових технологій Національного університету харчових технологій у викладанні лекційного матеріалу, практичних робіт, курсового проектування та виконання магістерських робіт (акти реалізації від 11.02.2019р. та від 25.02.2019р. відповідно).

**Особистий внесок здобувача в одержанні наукових результатів.** Основні теоретичні, практичні та експериментальні результати досліджень, що містяться у дисертаційній роботі, отримані автором особисто та опубліковані з необхідною повнотою.

Із опублікованих у співавторстві наукових роботах для дисертаційної роботи взяті саме ті ідеї та положення, котрі особисто розроблені здобувачем.

У роботах зі співавторством автору безпосередньо належить наступне: в реальних умовах зашумленості вхідних і вихідних сигналів отримано незміщені та ефективні оцінки параметрів передавальних функцій об’єкта керування завдяки застосуванню інтегрованого методу найменших квадратів [5, 6].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційних досліджень, практичні висновки та рекомендації, одержані в процесі досліджень, були апробовані, оприлюднені та отримали позитивну оцінку у ході науково-практичних конференцій, зокрема, міжнародних: ІХ Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки» (7-9 грудня 2016 р., м. Полтава); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації» (11-12 квітня 2017 р., м. Київ); XXIV Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (20-21 квітня 2017 р., м. Кременчук); Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток технічних наук: проблеми та рішення» (27-28 квітня 2018 р., м. Брно, Чеська

Республіка); всеукраїнських: II Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (17 листопада 2016 р., м. Полтава); 66 науковій конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ПолтНТУ (15 квітня – 15 травня 2014 р., м. Полтава); 68 науковій конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ПолтНТУ (19 квітня – 13 травня 2016 р., м. Полтава); 69 науковій конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ПолтНТУ (19 квітня – 19 травня 2017 р., м. Полтава).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 6 статей у наукових фахових виданнях та збірниках наукових праць, що входять до переліку рекомендованих МОН України [1-6], (4 з них одноосібні) у тому числі 5 статей – міжнародні публікації або у збірниках, що входять до міжнародних наукометричних баз даних [2-6].

Опубліковано 9 доповідей на наукових, науково-практичних і науково-технічних конференціях (семінарах) різного рівня, з яких 4 на міжнародних конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Робота складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Основна частина дисертації складає 145 сторінок. Робота містить 57 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел, що налічує 134 найменування та 4 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, подано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію щодо апробації роботи, її структури та обсягу, розкрито особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено аналіз властивостей зерна як об'єкта сушіння, розглянуті експериментальні закономірності процесу сушіння зерна, режими та методи його сушіння.

Встановлено, що термостійкість зерна характеризується максимальною температурою нагрівання, за якої забезпечується повне зберігання всіх якісних показників зерна. Межу нульового ступеня денатурації білків покладено в основу вибору режиму сушіння зерна. Особлива увага приділяється зрілості зерна. Оболонки свіжозібраного зерна, як ендосперм і зародок, ще недостатньо затверділи і вологопровідна здатність їх знижена. У зв'язку з цим термостійкість такого зерна знижується порівняно із зерном, що пройшло післязбиральне дозрівання. Щоб зберегти якість свіжозібраного зерна, його сушать, використовуючи знижені температуру агента сушіння на 20...30°C та температуру зерна на 10°C.

Із методів сушіння найпоширенішим є конвективний, за якого теплова енергія передається зерну від нагрітого газу. Те, що нагрітий газ водночас виступає як теплоносії та вологовбирач, зумовлює відносну простоту конструкцій конвективних

сушарок. Швидкість сушіння залежить від параметрів агента сушіння (температури, вологості та його швидкості) й визначається умовами зовнішньої дифузії вологи в навколишнє середовище.

Складовою процесу сушіння після нагрівання зерна є його охолодження. У прямоточних сушарках охолодження застосовується на кінцевій стадії сушіння, що пов'язано з необхідністю переведення зерна у рівноважний стан не тільки за вологістю, а й за температурою, з метою його тривалого зберігання. Температура зерна, що виходить із сушарки, може перевищувати температуру зовнішнього повітря не більш як на  $10^{\circ}\text{C}$ .

Режимом сушіння зерна являє сукупність певних параметрів агента сушіння та зерна: температури  $t_1$  агента, початкової вологості  $\omega_0$  та гранично допустимої температури  $\theta_{\text{гр}}$  нагрівання зерна.

Встановлено, що при сушінні попередньо нагрітого зерна поверхневий градієнт вологовмісту менший, ніж при звичайному конвективному сушінні, тобто зона випаровування розташовується поблизу зовнішньої поверхні матеріалу, до якої волога рухається у вигляді рідини. Це запобігає перегріванню поверхні матеріалу та сприяє зберігання і поліпшенню якості зерна.

В результаті, як компроміс по якості та вартості доцільно прийняти за основу створення нової міні-сушарки шахтну прямоточну зерносушарку.

У **другому розділі** встановлено, що сушіння зерна у шахтній прямоточній зерносушарці описується математичною моделлю з просторовим розподіленням параметрів. Дослідження статичної моделі сушарки реалізується розв'язуванням рівнянь статички з врахуванням граничних умов. Отриманий у цьому випадку розв'язок статичної моделі, як гладка функція просторових координат, визначає гладке розподілення визначального параметра вздовж просторових координат, Це дозволяє обмежити кількість первинних перетворювачів, для вимірювання температури  $\theta$  та вологості  $\gamma$  зерна у шахті сушарки.

Виходячи з фізичних основ процесу сушіння та структури математичної моделі зерносушарки з трьохмірним розподіленням у просторі  $(x, y, z)$  параметрів  $\theta$  і  $\gamma$ , наприклад:

$$\alpha \left( \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{\partial z^2} \right) = - \frac{q}{pc}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплопровідності;

$q$  – питомий об'ємний тепловий ефект перетворень;

$p$  – щільність зернового шару;

$c$  – теплоємність зерна;

з граничними умовами 3-го роду:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial \theta(x, y, z)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_x [\theta_0 - \theta(x, y, z) \Big|_{x=0}]; \\ -\lambda \frac{\partial \theta(x, y, z)}{\partial y} \Big|_{x=0} = \alpha_y [\theta_0 - \theta(x, y, z) \Big|_{x=0}]; \\ -\lambda \frac{\partial \theta(x, y, z)}{\partial z} \Big|_{x=0} = \alpha_z [\theta_0 - \theta(x, y, z) \Big|_{x=0}] \end{cases} \quad (2)$$

та гладкості просторового розподілу температури (і, відповідно, вологості) зернової маси  $\theta(x) = k \left( \frac{\delta-x}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1} \right) \theta_0$  та  $\theta(x) = k \left( \frac{x}{\lambda} + \frac{1}{\lambda} \right) \theta_1$  (де  $\theta_0$  – початкова температура зерна,  $\theta_1$  – температура сушильного агента), з метою спрощення побудови системи автоматичного керування процесом, доцільно перейти до системи з зосередженими параметрами, представивши її матричною передаточною функцією зв'язку і-х вхідних з j-ми вихідними змінними, які вимірюються у відповідних точках агрегату обмеженою кількістю первинних перетворювачів температури і вологості.

У **третьому розділі** розроблено структуру і алгоритм функціонування багатомірної автономної САК з еталонною моделлю, яка з необхідною якістю відпрацьовує завдання сушіння зерна (рис. 1).

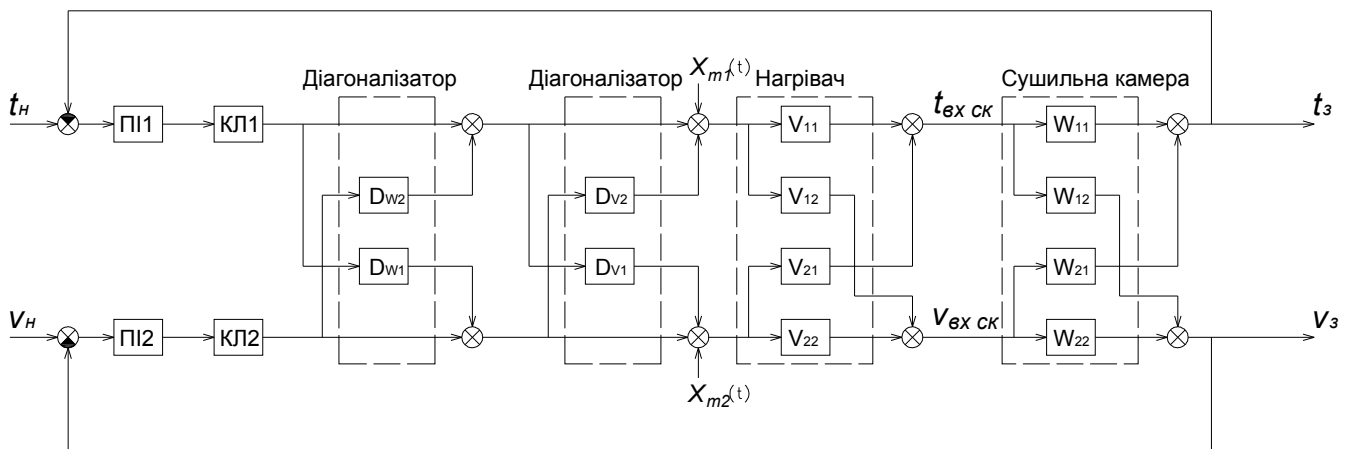


Рис. 1. Замкнена система керування процесом сушіння зерна

Модель зерносушарки, що розробляється має каскадне ввімкнення двомірної моделі сушильної камери і двомірної моделі виконавчого механізму (нагрівача-вентилятора). Відповідно спроектовано двокаскадну систему компенсаторів-діагоналізаторів для виконавчого пристрою ( $D_{v1}$ ,  $D_{v2}$ ) і для сушильної камери ( $D_{w1}$ ,  $D_{w2}$ ), щоб розв'язати взаємний вплив каналів керування температурою та вологістю.

$$W_{D_{v2}} = -\frac{V_{21}}{V_{11}} = \frac{2047,76s+4.179}{160s+1}; \quad (3)$$

$$W_{D_{v1}} = -\frac{V_{12}}{V_{22}} = -\frac{15.517s+0.103}{310s+1}. \quad (4)$$

Передавальні функції по каналах температури та вологості розв'язаної системи виконавчого механізму мають вигляд:

$$W_{t_1} = \frac{4.743 \cdot 10^6 s^2 + 4.352 \cdot 10^4 s + 83.49}{2.114 \cdot 10^8 s^3 + 2.435 \cdot 10^6 s^2 + 8352s + 8.7}; \quad (5)$$



$$W_{\gamma_1} = \frac{-4.743 \cdot 10^6 s^2 - 4.352 \cdot 10^4 s - 83.49}{4.985 \cdot 10^7 s^3 + 804670 s^2 + 4154 s + 6.7} \quad (6)$$

Враховуючи гладкість (обмеженість спектру сигналів) передавальні ланки  $W_{t_1}$  та  $W_{\gamma_1}$  спрощено, за допомогою методу Сімою, при ступінчатих вхідних сигналах  $P(t)$ ,  $V(t)$ , які мають суттєво ширший спектр, ніж робочі сигнали:

$$W_{t_1} c = \frac{83.49}{3850s + 8.7}; \quad (7)$$

$$W_{\gamma_1} c = \frac{-83.49}{800s + 6.7}. \quad (8)$$

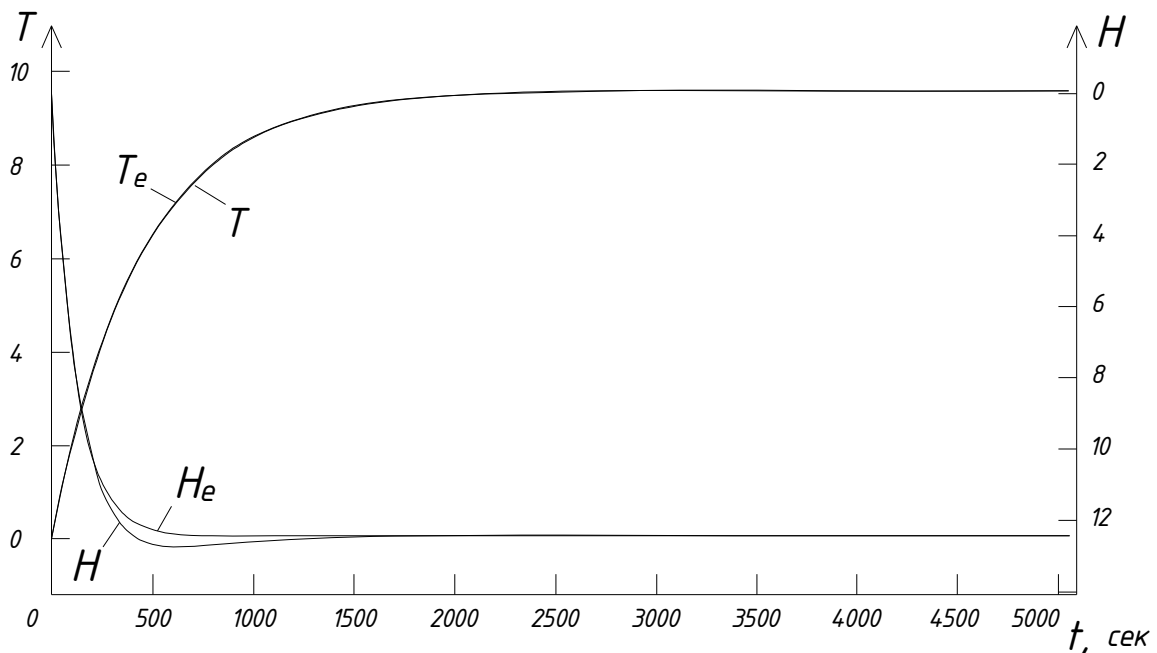


Рис. 2 – реакція на одиничний ступінчатий вплив передавальної функції виконавчого механізму по каналу температури ( $T$ ) та її спрощений відповідник ( $T_e$ ), а також реакція на одиничний ступінчатий вплив передавальної функції виконавчого механізму по каналу вологості ( $H$ ) та її спрощений відповідник ( $H_e$ )

Як видно з рис. 2 передавальні функції 3-го порядку з допустимою динамічною похибкою можна замінити еквівалентними функціями 1-го порядку.

Механізм знаходження передавальних функцій компенсатора-діагоналізатора системи з об'єктом керування аналогічний тому, що був використаний для усунення взаємного впливу каналів у виконавчому механізмові, тому запишемо одразу його результат – передавальні функції:

$$W_{D_{w1}} = \frac{-45,24 \cdot 10^4 s^2 - 4948,85 s - 9,7145}{20,2125 \cdot 10^5 s^2 + 8417,5 s + 8,7}; \quad (9)$$

$$W_{D_{w2}} = \frac{-73,15 \cdot 10^4 s^2 - 3578 s - 4,35}{23,96 \cdot 10^4 s^2 + 3057,9 s + 6,7}. \quad (10)$$

Для подальшого спрощення передавальних функцій методом логарифмічних амплітудно-частотних характеристик підбираємо послідовні коригувальні ланки, композиція яких з передавальними функціями дає спрощену передавальну функцію, подальше спрощення якої для розрахунку оптимальних параметрів регуляторів виконано методом Сімою.

Для керування системою використано пропорційно-інтегральні регулятори в контурі температури та вологості. Для знаходження коефіцієнтів ( $K_n$  та  $K_i$ ) регуляторів представлено складні передавальні функції контурів композицією ланок 1-го порядку (спрощено за допомогою методу Сімою) (рис. 3):

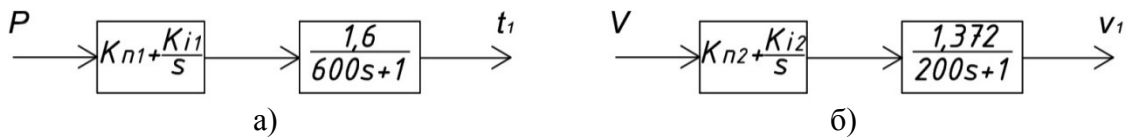


Рис. 3 а) – контур керування температурою з ПІ-регулятором; б) – контур керування вологістю з ПІ-регулятором

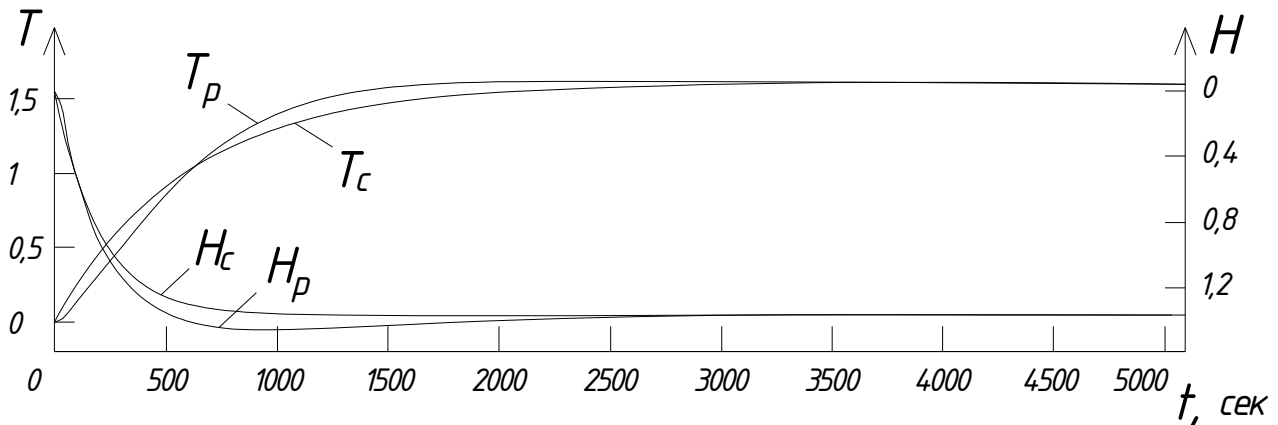


Рис. 4. Реакція системи на одиничний ступінчатий вплив по контуру температури: “реальна” ( $T_p$ ) та спрощена ( $T_c$ ), а також реакція системи на одиничний ступінчатий вплив по контуру вологості: “реальна” ( $H_p$ ) та спрощена ( $H_c$ )

Як видно з рис. 4 передавальні функції високих порядків контурів температури та вологості можна представити ланками 1-го порядку з незначною похибкою в динаміці перехідного процесу, як реакції на ступінчасту функцію. Додамо у канали керування ПІ-регулятори (рис. 3) та прирівняємо їх передавальні функції до еталонної моделі. В якості еталонної моделі (рис. 5) використано інтегральну ланку з одиничним зворотним зв'язком.



Рис. 5 а) – еталонна модель контуру температури; б) – еталонна модель контуру вологості

У відповідності до розробленої системи керування створено дослідний зразок. За його основу взято сушильну секцію зерносушарки ДСП–32от у масштабі 1:4. Він складається з сушильної камери (об'єкт керування) розміром 485x720x300 мм до якої входить 50 коробів та 8 напівкоробів (з них 30 підвідних коробів, 20 коробів та 8 напівкоробів відвідних, дифузора, нагрівального елемента (виконавчий пристрій SEN 50–25/22,5) та підвідного повітропроводу з вентилятором (виконавчий пристрій).

Вимірювальна система складається з цифрових давачів вологості та температури (змонтованих на одній платі (HTU21D)), контролера Arduino та персонального комп'ютера.

Фізична модель зерносушарки (рис. 6) зібрана на основі лабораторного стенда, що забезпечує подачу сушильного агента (повітря) до сушильної камери по трьох фіксованих положеннях (витрата складає 0,2 м<sup>3</sup>/с, 0,23 м<sup>3</sup>/с та 0,241 м<sup>3</sup>/с). Виходячи з підвідного повітропроводу сушильний агент потрапляє до нагрівального пристрою (виконавчий механізм – електронагрівач SEN 50–25/22,5), що працює у двох положеннях потужності: 2,5кВт та 5кВт, у третьому положенні нагрівач вимкнено. Далі підігрітий сушильний агент через дифузор надходить до сушильної камери, де проходячи через шар зерна віддає частину власної температури та забирає частину вологості зерна.



Рис. 6. Дослідний зразок зерносушарки

Проведено комп'ютерне моделювання роботи зерносушарки в різних режимах роботи. Аналіз графіків моделювання показав, що розроблена система керування задовольняє показники якості при визначених параметрах об'єкта керування (рис. 7, 8).

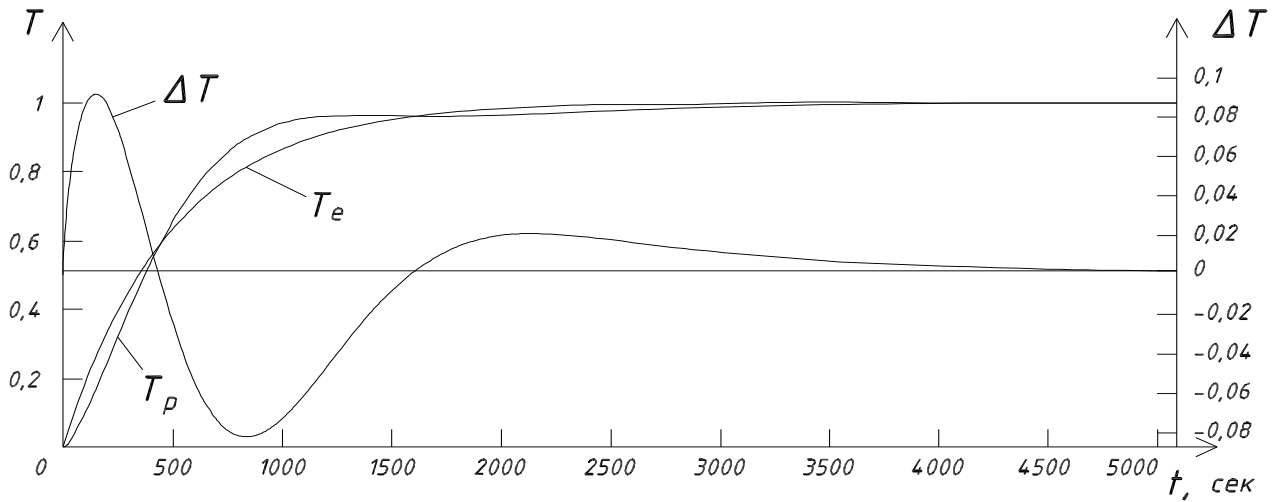


Рис. 7 – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу температури ( $T_p$ ) і еталонної моделі ( $T_e$ ), а також похибка між еталонною та реальною моделями по каналу температури ( $\Delta T$ )

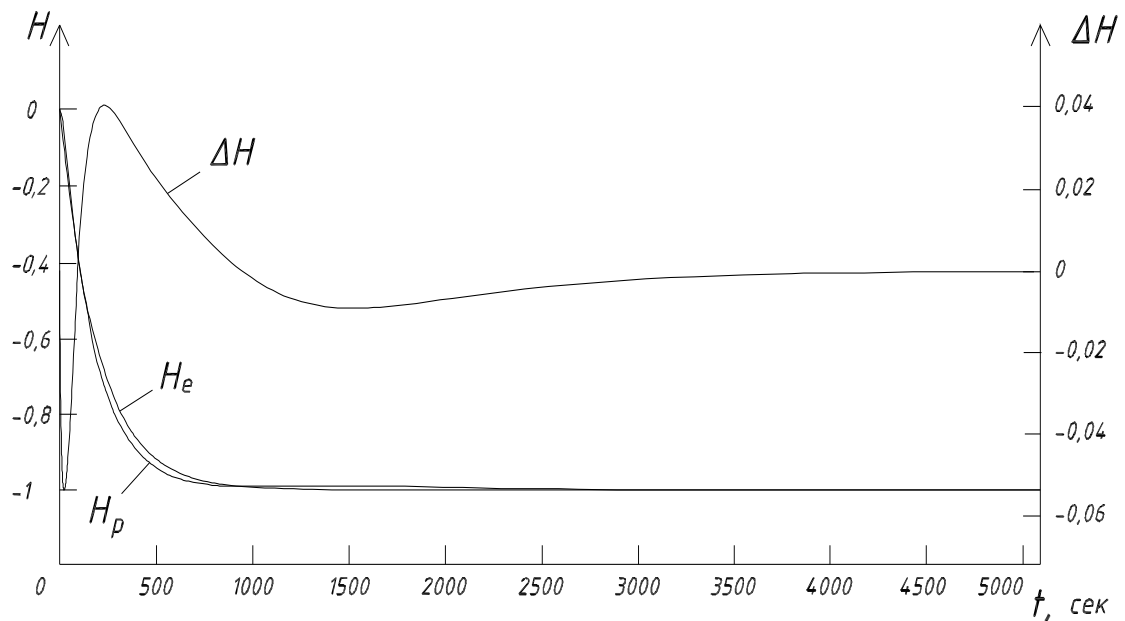


Рис. 8 – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу вологості ( $H_p$ ) і еталонної моделі ( $H_e$ ), а також похибка між еталонною та реальною моделями по каналу вологості ( $\Delta H$ )

Однак, у процесі сушіння, параметри зерна змінюються. Це призводить до того, що система не може якісно керувати процесом сушіння (з'являється перерегулювання, збільшується час перехідного процесу) або взагалі стає некерованою (рис. 9, 10).

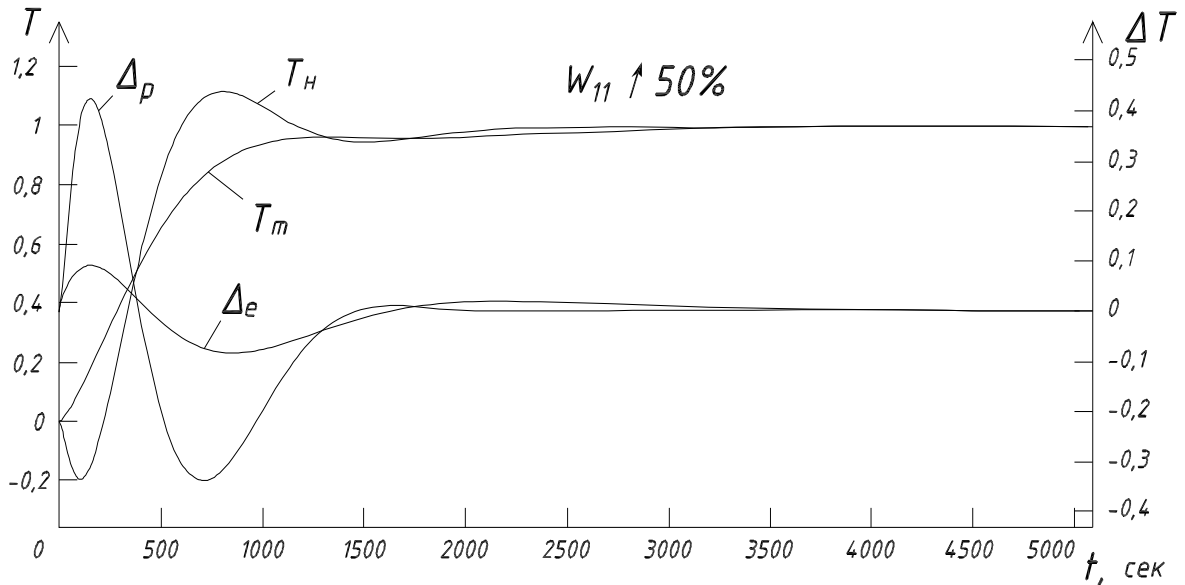


Рис. 9 – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу температури при вихідних параметрах ( $T_m$ ) та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки  $W_{11}$  на 50% ( $T_H$ ), а також графіки похибок між еталонною ( $\Delta e$ ) і реальною ( $\Delta p$ ) моделями по каналу температури при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки  $W_{11}$  на 50%

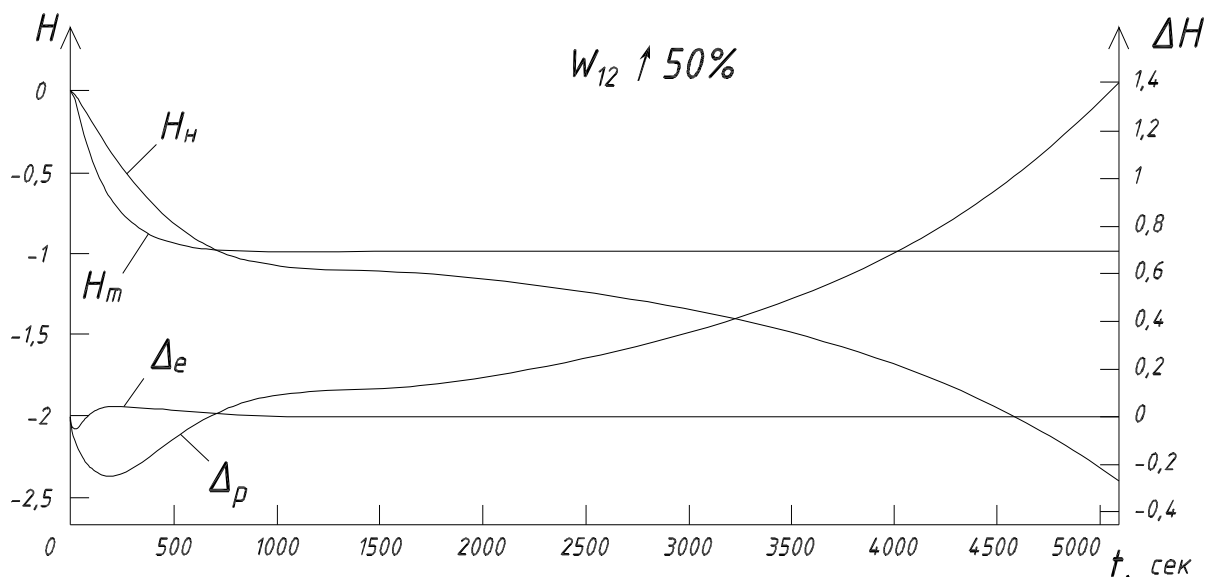


Рис. 10 – реакція системи керування процесом сушіння зерна на одиничний ступінчатий вплив по каналу вологості при вихідних параметрах ( $H_m$ ) та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки  $W_{12}$  на 50% ( $H_n$ ), а також графіки похибок між еталонною ( $\Delta e$ ) і реальною ( $\Delta p$ ) моделями по каналу вологості при вихідних параметрах та при збільшенні коефіцієнта підсилення ланки  $W_{12}$  на 50%

Тому, для вирішення даної проблеми, потрібно відслідковувати зміну параметрів об'єкта керування. Дану задачу вирішує побудова підсистеми ідентифікації. Доповнення системи автономного оптимального (в сенсі відповідності до еталона) керування сушаркою, як багатомірним об'єктом, підсистемою ідентифікації параметрів прямих і перехресних зв'язків в об'єкті керування, дозволяє створити функціонально надійну САК (рис. 11) в умовах нестационарності і стохастичності характеристик об'єкта.

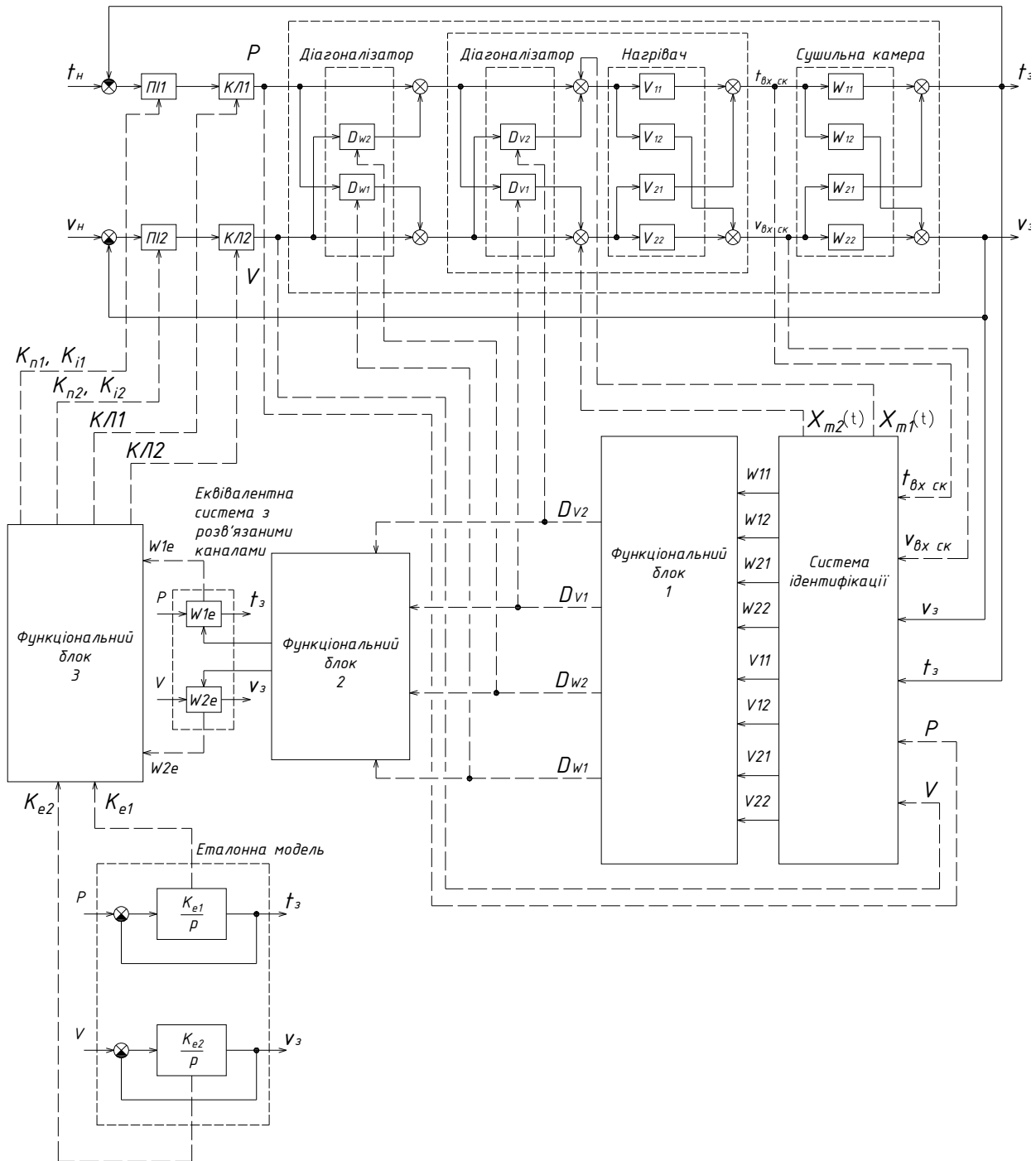


Рис. 11. Система автоматизованого керування процесом сушіння зернових культур

У четвертому розділі використовуючи системний підхід та структуру і алгоритми функціонування багаторазово адаптивної системи ідентифікації побудовано підсистему ідентифікації процесів у сушарці.

Враховуючи не стандартну для використання метода найменших квадратів реальну ситуацію зашумленості як вихідних, та і вхідних змінних об'єкта ідентифікації, в якості оптимального (в сенсі незміщеності і ефективності оцінок параметрів) було протестовано і використано більш досконалий метод мінімізації оптимально взваженої суми симетричних кореляційних функцій  $I = \frac{1}{2} \int_{-\tau_2}^{\tau_1} \eta(\theta) \int_0^T \varepsilon(t) \varepsilon(t + \theta) dt d\theta$  (інтегрований МНК) (табл. 1).

Таблиця 1.

Результати оцінювання у випадку зашумленості  $x(t)$  і  $y(t)$  білим шумом

№	МНК – оцінювання		Оцінювання запропонованим методом	
	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$
1	0,4790	0,4981	1,0282	0,9094
2	0,4607	0,4493	1,0179	0,8844
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	0,4676	0,4856	1,0825	0,7197
10	0,4642	0,6015	0,9653	1,0112
$\bar{\beta}$	0,4860	0,5082	1,0047	0,943
$\sigma_{\beta_i}^2$	0,00038	0,0026	0,0241	0,0283
$\sigma_{\beta_i}$	0,0197	0,0511	0,1551	0,1682

Для визначення передаточних функцій “вхід–вихід” використано дані, отримані під час дослідження роботи експериментального зразка зерносушарки (рис. 6).

Ідентифікації підлягають як безпосередньо процеси в сушильному просторі сушарки, так і у виконавчому пристрої нагріву і подачі повітря.

Відповідно до принципу раціонального ускладнення *на першому кроці* релаксаційного процесу (РП) методом МНК були отримані статичні коефіцієнти зв'язку відповідних вхідних змінних виконуючого пристрою і об'єкта. Для цього використовувалися ділянки усталених значень приростів відповідних вхідних та вихідних змінних за умови ступінчатої зміни одного з вхідних впливів (потужність  $P_{ел}$  нагрівача або швидкість  $V$  потоку повітря). Наприклад, для визначення статичного коефіцієнту  $\alpha_{12}$  в передаточній функції  $V_{12}(p)$  нагрівача визначалася МНК – оцінка  $\hat{\alpha}_{12}$  коефіцієнту  $\alpha_{12}$ :

$$\hat{\alpha}_{12} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta \gamma_{вх}(i) \cdot P_{ел}(i)}{\sum_{i=1}^N (\Delta P_{ел}(i))^2}. \quad (11)$$

Або для перехресної передаточної функції  $W_{21}(p)$  об'єкта МНК–оцінка  $\hat{K}_{21}$  статичного коефіцієнта  $K_{21}$ :

$$\hat{K}_{21} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_{вих}(i) \cdot \Delta \gamma_{вх}(i)}{\sum_{i=1}^N (\Delta \gamma_{вх}(i))^2}. \quad (12)$$

Знаходження інших статичних коефіцієнтів проводиться аналогічно.

Однак, у наведених вище формулах при МНК – оцінюванні в знаменниках маємо суму квадратів відповідних приростів змінних ( $\Delta P_{ел}(i)$ ,  $\Delta \gamma_{вх}(i)$ ,  $i = \overline{1, N}$ ), які являють собою адитивну суміш корисної складової і випадкового збурення чи

похибок вимірювання. Тому МНК – оцінки  $\hat{\alpha}_{ij}$ ,  $\hat{K}_{ij}$  коефіцієнтів  $\alpha_{ij}$ ,  $K_{ij}$ ,  $i, j=1, 2$  були занижені. За умови, що  $N \rightarrow \infty$  їх математичні очікування, наприклад  $M\{\hat{K}_{21}\}$  дорівнюють:

$$M\{\hat{K}_{21}\} = \frac{M\{\Delta t_{\text{Вих}}(i) \cdot \Delta \gamma_{\text{Вх}}(i)\}}{M\{\Delta \gamma_{\text{Вх}}^*(i)\}^2 + M\{y(i)\}^2} \quad (13)$$

де  $\Delta \gamma_{\text{Вх}}^*(i)$  – точне значення,  $y(i)$  – випадкова похибка, близька до “білого шуму”.

Тому на другому кроці РП від МНК було здійснено перехід до запропонованого методу, яким отримано незміщені і більш ефективні оцінки відповідних коефіцієнтів, а саме:

$\alpha_{11} = 6,7$  (град/Вт);  $\alpha_{12} = -0,9$  (% вологості/Вт);  $\alpha_{21} = -28$  (град/[м<sup>3</sup>/с]);  $\alpha_{22} = -8,7$  (% вологості/[м<sup>3</sup>/с]);  $K_{11} = 0,6$  (град/град);  $K_{12} = -0,58$  (% вологості/град);  $K_{21} = -0,3$  (град/% вологості);  $K_{22} = 0,4$  (% вологості/% вологості).

На третьому кроці РП запропонованим методом із динаміки першого наближення (інерційних ланок I порядку) визначалася відповідна стала часу  $\tau$ .

У загальному представленні рівняння ланки має вигляд:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y(t) = k \cdot x(t) = x_1(t), \quad (14)$$

де  $x_1(t) = k \cdot x(t)$  відоме, оскільки коефіцієнт  $k$  уже визначено із статички.

Невідому сталу часу  $\tau$  визначаємо запропонованим методом із зашумлених випадковими впливами і похибками вимірювання даних динаміки процесів (рис. 12 а, б, в, г).

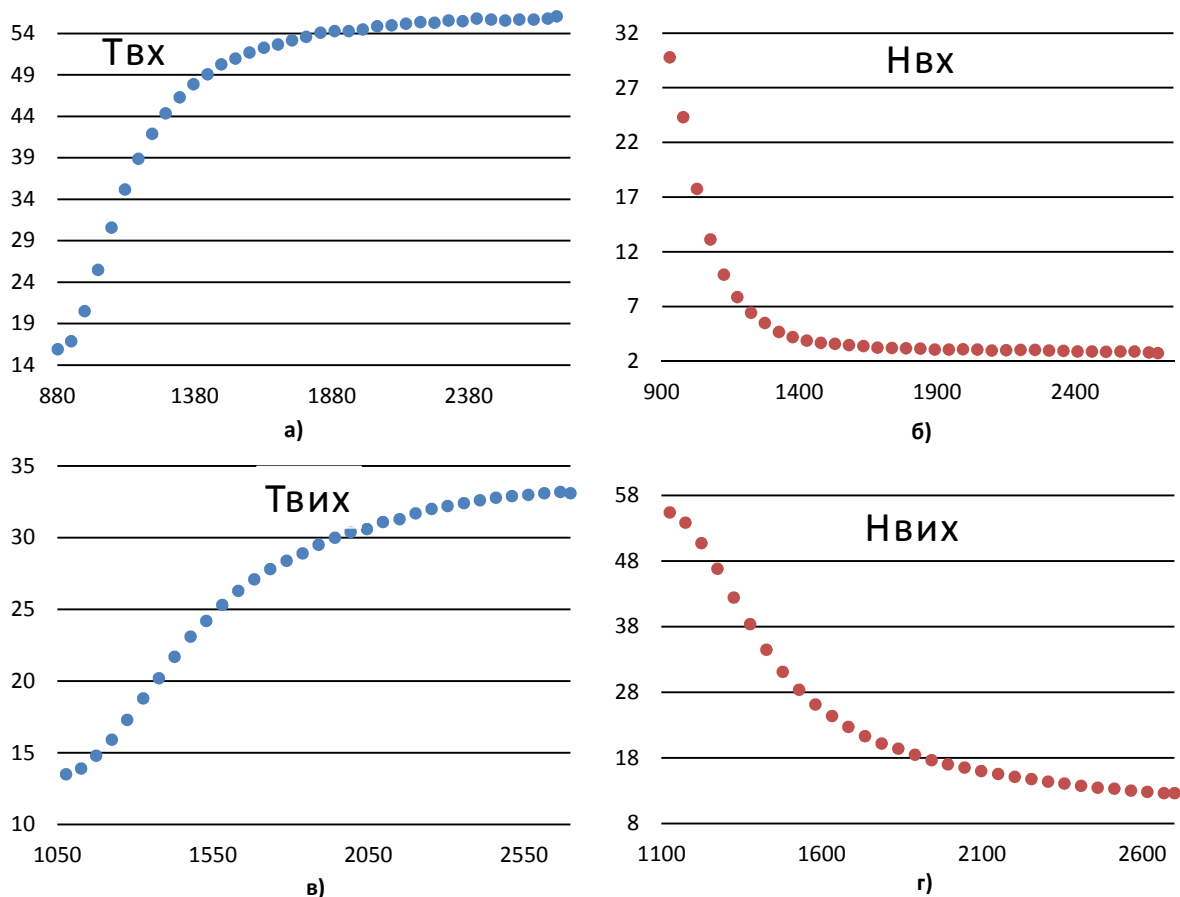


Рис. 12. Перехідні процеси: а) – зміни температури теплоносія на вході в сушильну камеру; б) – зміни вологості теплоносія на вході в сушильну камеру; в) – зміни температури теплоносія на виході із сушильної камери; г) – зміни вологості теплоносія на виході із сушильної камери



Для цього від рівняння  $\tau \frac{dy}{dt} + y(t) = x_1(t)$  перейдемо до наближеного різницевого еквіваленту:

$$\tau \frac{y(i+1)-y(i)}{\Delta t} + y(i) = x_1(i), \quad (15)$$

або

$$y(i+1) = \frac{\Delta t}{\tau} x_1(i) + \frac{(1-\Delta t)}{\tau} y(i), \quad (16)$$

де змінні  $y(i)$ ,  $y(i+1)$ ,  $x_1(i)$  вимірюються з шумами.

Позначим  $\frac{\Delta t}{\tau}$  як  $\beta_1$ ,  $\frac{1-\Delta t}{\tau}$  як  $\beta_2$ , маючи крок  $\Delta t$  на 3 порядки менший за  $\tau$ , можна прийняти, що  $\frac{\beta_1}{\Delta t} \approx \beta_2 = \tau^{-1}$  або  $\tau = \left(\frac{\beta_1}{\Delta t} + \beta_2\right) \cdot 0,5$ .

Тоді з рівняння

$$y(i+1) = \beta_1 \cdot x_1(i) + \beta_2 \cdot y(i), \quad (17)$$

для  $i = \overline{1, N}$ ,  $N \gg 2$  ( $N=2000$ ) запропонованим методом в режимі off-line було отримано незміщені оцінки сталих часу  $\tau$  для кожного із каналів  $i$ , як результат, відповідні передаточні функції  $V_{ij}$  виконуючого пристрою та  $W_{ij}$  об'єкта:

$$V_{11}(p) = \frac{6,7}{490 \cdot p+1}; \quad V_{12}(p) = \frac{-0,9}{310 \cdot p+1}; \quad (18)$$

$$V_{21}(p) = \frac{-28}{160 \cdot p+1}; \quad V_{22}(p) = \frac{-8,7}{150 \cdot p+1}; \quad (19)$$

$$W_{11}(p) = \frac{0,6}{380 \cdot p+1}; \quad W_{12}(p) = \frac{-0,58}{525 \cdot p+1}; \quad (20)$$

$$W_{21}(p) = \frac{-0,3}{337 \cdot p+1}; \quad W_{22}(p) = \frac{0,4}{390 \cdot p+1}. \quad (21)$$

В on-line режимі відповідні передаточні функції уточнюються за умови, якщо похибки стабілізації температури і вологості зернової маси в сушарці виходить за допустимі межі:

- при збільшенні температури подають східчастий вплив потужності нагрівача зі знаком мінус і навпаки;
- при збільшенні вологості подають східчастий вплив швидкості  $V$  потоку вентилятора зі знаком мінус і навпаки.

За записами реакції на ці впливи підсистема ідентифікації уточнює відповідні коефіцієнти  $i$ , як наслідок, уточнюються параметри підсистеми розв'язки каналів (діагоналізатора), корегуючих ланок та ПІ-регуляторів, наближаючи динаміку і статику каналів до еталонної.

У результаті використання ІМНК отримані незміщені і ефективні оцінки передаточних функцій сушарки, що дозволили реалізувати оптимальні адаптивні алгоритми автономного керування окремими каналами температури вологості сушарки як багатомірного об'єкта з перехресними зв'язками.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої системи автоматичного керування процесом сушіння зернових культур складає 561,7 тис. грн. Термін окупності витрат на виготовлення зерносушарки — 5 місяців.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі запропоновано новий підхід до вирішення проблеми сушіння зернових культур, який полягає у створенні адаптивної оптимальної системи автоматичного керування процесом сушіння, що дозволяє отримати кондиційне зерно для якісного подальшого транспортування, зберігання та переробки.

1. Із численних методів теплового сушіння найпоширенішим є конвективний, за якого тепла енергія передається зерну від нагрітого газу (повітря або його суміші з продуктами згоряння палива). Те, що нагрітий газ водночас виступає як теплоносій та вологовбирач, зумовлює відносну простоту конструкцій конвективних сушарок. Показано, що при виборі методів попереднього оброблення та режимів сушіння зерна необхідно враховувати його термо- і вологостійкість, біологічну природу та структурно-механічні властивості, від яких залежить утворення тріщин. Встановлено, що при сушінні попередньо нагрітого зерна поверхневий градієнт вологовмісту менший, ніж при звичайному конвективному сушінні, тобто зона випаровування розташовується поблизу зовнішньої поверхні матеріалу, до якої волога рухається у вигляді рідини. Це запобігає перегріванню поверхні матеріалу та сприяє зберіганню і поліпшенню якості зерна.

2. Виходячи з фізичних основ процесу сушіння та структури математичної моделі з розподіленими параметрами, гладкості просторового розподілу температури (і, відповідно, вологості) зернової маси, а також аперіодичності динамічних процесів, з метою спрощення побудови САК процесом, доцільно перейти від системи з розподіленими до системи із зосередженими параметрами, представивши її матричною передаточною функцією зв'язку  $i$ -х вхідних з  $j$ -ми вихідними змінними, які вимірюються у відповідних точках агрегату обмеженою кількістю первинних перетворювачів температури і вологості.

3. Розроблено структуру і алгоритм функціонування багатомірної автономної САК із еталонною моделлю, яка з достатньою якістю відпрацьовує завдання сушіння зерна. Однак у процесі сушіння параметри зерна змінюються. Це призводить до того, що система не може якісно керувати процесом сушіння (з'являється перерегулювання, збільшується час перехідного процесу) або взагалі стає не керованою. Показано, що для вирішення даної проблеми потрібно відслідковувати зміну параметрів об'єкта керування. Дану проблему вирішує побудова підсистеми ідентифікації. Доповнення системи автономного оптимального (в сенсі відповідності до еталона) керування сушаркою, як багатомірним об'єктом, підсистемою ідентифікації параметрів прямих і перехресних зв'язків в об'єкті

керування, дозволило створити функціонально надійну САК в умовах нестаціонарності і стохастичності характеристик об'єкта і середовища.

4. Використання системного підходу та структури і алгоритмів функціонування багаторазово адаптивної системи ідентифікації дозволило коректно підібрати метод ідентифікації процесів у сушарці.

Враховуючи не стандартну для використання метода найменших квадратів реальну ситуацію зашумленості як вихідних, та і вхідних змінних об'єкта ідентифікації, в якості оптимального (в сенсі незміщеності і ефективності оцінок параметрів) був протестований і використаний більш досконалий (ніж МНК) метод мінімізації оптимально взваженої суми симетричних кореляційних функцій.

5. Отримані незміщені і ефективні оцінки параметрів передаточних функцій сушарки дозволили реалізувати оптимальні адаптивні алгоритми автономного керування окремими каналами температури і вологості сушарки як багатомірного об'єкта з перехресними зв'язками.

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. **Захарченко Р.В.** Аналіз режимів сушки на основі математичної моделі / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2015. – Випуск 3(35). – С. 83 – 84.

2. **Захарченко Р.В.** Моделювання процесу теплообміну через елементарний шар зерна / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 2(38). – С. 38 – 40. *(стаття індексується наукометричними базами даних Index Copernicus, General Impact Factor, Academic Resource Index та Scientific Indexed Service)*

3. **Захарченко Р.В.** Аналіз багатовимірних систем за допомогою масиву відносних коефіцієнтів підсилення / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 3(39). – С. 20 – 23. *(стаття індексується наукометричними базами даних Index Copernicus, General Impact Factor, Academic Resource Index та Scientific Indexed Service)*

4. **Захарченко Р.В.** Розв'язане керування багатовимірними системами / Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2016. – Випуск 4(40). – С. 18 – 20. *(стаття індексується наукометричними базами даних Index Copernicus, General Impact Factor, Academic Resource Index та Scientific Indexed Service)*

5. **Захарченко Р.В.** Дослідження інтегрованого методу ідентифікації / А.М. Сільвестров, Г.І. Кривобока, Р.В. Захарченко // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний

університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2017. – Випуск 2(42). – С. 55 – 56. (стаття індексується наукометричними базами даних *Index Copernicus, General Impact Factor, Academic Resource Index та Scientific Indexed Service*)

6. **Zaharchenko R.V.** Research integrated identification method / A.M. Silvestrov, G.I. Kryvoboka, R.V. Zaharchenko // *Electronics and Control Systems*. Kyiv: NAU, 2017. – no. 1(51). – P. 88–90. (стаття індексується наукометричними базами даних *Russian science citation index, CrossRef Indexing, та Ulrich's Periodicals Directory*)

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

7. **Захарченко Р.В.** Методи зберігання зернових культур з автоматичним підтриманням необхідних параметрів / А.М. Сільвестров, О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2014. – Т. 1. – С. 45 – 47.

8. **Захарченко Р.В.** Дослідження засобів захисту зерна від шкідливих захворювань у елеваторах за допомогою автоматичного контролю кліматичних характеристик / А.М. Сільвестров, О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Тези 66-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 15 квітня – 15 травня 2014 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2014. – Т. 1. – С. 47 – 48.

9. **Захарченко Р.В.** Аналіз режимів сушки зерна на основі математичної моделі / Р.В. Захарченко // Тези 68-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 19 квітня – 13 травня 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – Т. 1. – С. 47 – 49.

10. **Захарченко Р.В.** Опис процесу теплообміну у шарі зерна / Р.В. Захарченко // Тези II Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». (Полтава, 17 листопада 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 44 – 46.

11. **Захарченко Р.В.** Керування багатовимірними системами за допомогою розв'язуючих мереж / О.В. Шульга, Р.В. Захарченко // Збірник наукових праць за матеріалами IX Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки». (Полтава, 7-9 грудня 2016 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2016. – С. 246 – 250.

12. **Захарченко Р.В.** Застосування розв'язуючих мереж при розв'язанні контурів багатовимірних систем / Р.В. Захарченко // Тези восьмої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації». Державний університет телекомунікацій. – Київ, 11 – 12 квітня 2017 р. – С. 174.

13. **Захарченко Р.В.** Дослідження інтегрованого методу ідентифікації / Р.В. Захарченко // Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства». КрНУ ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 20-21 квітня 2017 р. – С. 90.

14. **Захарченко Р.В.** Моделювання інтегрованого методу ідентифікації в середовищі MATLAB / А.М. Сільвестров, Р.В. Захарченко // Тези 69-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. (Полтава, 19 квітня – 19 травня 2017 р.) – Полтава: ПолтНТУ. – 2017. – Т. 1. – С. 3 – 4.

15. **Zaharchenko R.V.** Research integrated identification method for the work of grain dryer / A.M. Silvestrov, G.I. Kryvoboka, R.V. Zaharchenko // The development of technical science: problems and solutions. Proceedings of the international research and practical conference. – The Czech Republic, Brno. – April 27 – 28, 2018. – pp. 105-108.

## АНОТАЦІЯ

**Захарченко Р.В.** Автоматизована система керування процесом сушіння зернових культур. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2019.

У дисертаційній роботі запропоновано новий підхід до вирішення проблеми сушіння зернових культур, що полягає у створенні адаптивної оптимальної системи автоматичного керування процесом сушіння, яка дозволяє отримати кондиційне зерно для якісного подальшого транспортування, зберігання та переробки.

Розроблено структуру і алгоритм функціонування багатомірної автономної САК з еталонною моделлю, яка з необхідною якістю відпрацьовує завдання сушіння зерна.

Використовуючи системний підхід та структуру і алгоритми функціонування багаторазово адаптивної системи ідентифікації побудовано підсистему ідентифікації процесів у сушарці.

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження розробленої системи автоматичного керування процесом сушіння зернових культур складає 561,7 тис. грн.

*Ключові слова:* зерносушарка, сушильна камера, система з розподіленими параметрами, багатомірна модель, еталонна модель, адаптивна оптимальна система автоматичного керування, ідентифікація.

## АННОТАЦИЯ

**Захарченко Р.В.** Автоматизированная система управления процессом сушки зерновых культур. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. — Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий, 2019.

В диссертационной работе предложен новый подход к решению проблемы сушки зерновых культур, что заключается в создании адаптивной оптимальной системы автоматического управления процессом сушки, которая позволяет

получить кондиционное зерно для качественного дальнейшей транспортировки, хранения и переработки.

Разработана структура и алгоритм функционирования многомерной автономной САУ с эталонной моделью, которая с необходимым качеством обрабатывает задачи сушки зерна.

Используя системный подход, структуру и алгоритмы функционирования многократно адаптивной системы идентификации построено подсистему идентификации процессов в сушилке.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанной системы автоматического управления процессом сушки зерновых культур составляет 561,7 тыс. грн.

*Ключевые слова:* зерносушилка, сушильная камера, система с распределенными параметрами, многомерная модель, эталонная модель, адаптивная оптимальная система автоматического управления, идентификация.

## ABSTRACT

**Zaharchenko R.V. Automated system for controlling the process of drying the grain. – The Manuscript.**

Dissertation for obtaining a scientific degree of a Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.07 – automation of control processes. – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2019.

The dissertation is devoted to a new approach to solving the problem of grain drying, which is to create an adaptive optimal system of automatic control of the drying process, which allows to obtain the conditioned grain for quality further storage.

In the first section an analysis of grain properties as an object of drying is carried out, experimental regularities of the grain drying process, modes and methods of drying are considered.

According to the results of the analysis in the first section, it was established that the heat resistance of the grain is characterized by the maximum temperature of heating, which ensures complete storage of all qualitative indicators of grain. The limit of the zero degree of denaturation of proteins is the basis for choosing the grain drying regime.

It is established that during drying of preheated grain, the surface gradient of moisture content is less than that of conventional convective drying, that is, the evaporation zone is located near the outer surface of the material to which the moisture moves in the form of a liquid. This prevents overheating of the surface of the material and promotes the storage and improvement of the quality of the grain.

As a result of the analysis of grain properties and drying processes, as a compromise on quality and cost, it is advisable to take as a basis for the creation of a new mini-dryer a mine direct-feed grain dryer.

In the second section it is established that drying of grain in a mine direct-feed grain dryer is described by a mathematical model with spatial distribution of parameters.

A study of a static dryer model is realized by solving static equations with allowance for boundary conditions. In this case, the solution of the static model as a smooth spatial coordinate function determines the smooth distribution of the defining

parameter along spatial coordinates. This allows to limit the number of primary transducers to measure the temperature and humidity of the grain in the dryer shaft.

Proceeding from the physical foundations of the drying process and the structure of the mathematical model of a dryer with three-dimensional distribution in the parameter space in the Cartesian coordinate system with boundary conditions of the third kind and the smoothness of the spatial temperature distribution (and humidity respectively) of the grain mass, in order to simplify the construction of the system of automatic process control, it is expedient to move from a system with distributed to a system with lumped parameters, introducing it to the matrix transmitted communication function  $i$ -th inputs with  $j$ -th output variables, which are measured in corresponding points of the unit with a limited number of primary temperature and humidity converters.

In the third section, the structure and algorithm of functioning of a multidimensional autonomous ACS with a reference model, which fulfills the task of drying the grain with the necessary quality, is developed.

The analysis of the simulation schedules showed that the developed control system satisfies the quality indicators at the determined parameters of the control object. However, during the drying process, the grain parameters change. This leads to the fact that the system cannot manage the drying process qualitatively (there is overregulation, the time of the transient process increases) or it becomes unmanageable at all. Therefore, in order to solve this problem, it is necessary to monitor the change of the parameters of the control object. This task is solved by building a subsystem of identification. The complement of the system of autonomous optimal (in the sense of conformity with the standard) control of the dryer as a multidimensional object, the subsystem of identification of the parameters of direct and cross-links in the control object, allows us to create a functionally reliable ACS in conditions of unsteadiness and stochastic characteristics of the object.

In the fourth section, using the system approach and the structure and algorithms of the operation of the multiple-adaptive identification system, a subsystem of process identification in the dryer was built.

Taking into account the standard situation for the use of the least squares method for the real situation of noise in both the output and the input variables of the identification object, the method of minimizing the optimally weighed amount was tested and used more perfectly (in the sense of unboundness and efficiency of the parameter estimates) symmetric correlation functions.

As a result of the use of the ILSM, unmatched and effective estimates of the transfer functions of the dryer have been obtained, which allowed to implement optimal adaptive algorithms for autonomous control of separate channels of humidity temperature of the dryer as a multidimensional object with cross-links.

*Key words:* grain dryer, drying chamber, distributed parameter system, multidimensional model, reference model, adaptive optimal automatic control system, identification.

Поліграфічний центр  
Полтавського національного технічного університету  
імені Юрія Кондратюка  
36011, Полтава, просп. Першотравневий, 24.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного  
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції,  
серія ДК, №3130 від 06.03.2008 року.  
Папір офсетний. Друк RISO.  
Ум. друк. арк. 1,34. Наклад 100 прим.  
Формат 60 x 90/16. Зам. № 116 від «02» вересня 2019 р.