



УДК 681.5

## СТРУКТУРНА ТА ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ У СКЛАДІ ЗЕРНОСУШАРКИ НЕПЕРВНОЇ ДІЇ

### STRUCTURAL AND PARAMETRICAL IDENTIFICATION OF A HEAT PUMP IN A CONTINUOUS GRAIN DRYER

Болокан О. С.<sup>1</sup>, Букарос А. Ю.<sup>2</sup>

Bolokan O.<sup>1</sup>, Bucaros A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

<sup>2</sup>Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0006-7486-44441>, <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-6306-08742>

Email: <sup>1</sup>[mister.bolokan39@gmail.com](mailto:mister.bolokan39@gmail.com), <sup>2</sup>[andrey.bucaros@gmail.com](mailto:andrey.bucaros@gmail.com)

Copyright © 2025 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: [10.15673/atbp.v17i3.3254](https://doi.org/10.15673/atbp.v17i3.3254)

**Анотація.** Енергоефективність зерносушильного обладнання стає важливою задачею через значні витрати енергії при сушінні зерна, особливо насінневого, і зростання цін на енергоносії. Теплонасосне сушіння є перспективним методом, що потребує вдосконалення алгоритмів керування для досягнення балансу між енергоефективністю та технічними можливостями обладнання. Проведений огляд літератури встановив, що у існуючих дослідженнях процесу теплонасосного сушіння сільськогосподарської продукції недостатньо вивчені питання взаємного впливу параметрів процесу, зовнішніх збурень та динамічних характеристик теплового насоса. У цьому дослідженні запропоновано вирішити поставлену проблему шляхом структурної та параметричної ідентифікації теплового насоса як об'єкту керування. Для цього складена технологічна схема процесу теплонасосного сушіння зерна у модифікованій зерносушарці неперервної дії виробництва Франції. Проведено експериментальне дослідження параметрів теплового насоса у складі зерносушарки. Зокрема, отримані статичні та динамічні характеристики теплового насоса по каналах керування тепловолісними параметрами сушильного агента при зміні керуючих впливів. Отримані характеристики дозволили оцінити взаємний вплив параметрів функціонування теплового насоса: температури кипіння та конденсації холодильного агента, положення терморегулюючого вентиля та продуктивності компресора на регульовані координати: температуру та вологовміст сушильного агента. На підставі цих даних розроблена параметрична схема теплового насоса, яка включає два прямих канали керування, два перехресних зв'язки та два канали збурення. Встановлено, що по всіх каналах у робочому діапазоні температур та вологовмісту сушильного агента тепловий насос може бути досить точно описаний лінійними диференціальними рівняннями та володіє властивостями самовирівнювання. Отримані експериментальні дані дозволили провести ідентифікацію математичних моделей каналів керування, контрольованих збурень та перехресних зв'язків у вигляді передатних функцій першого та другого порядку. Розроблені моделі можуть слугувати основою для створення імітаційної моделі зерносушарки з тепловим насосом як об'єкту керування та розроблення енергоефективних алгоритмів керування основними параметрами процесу теплонасосного сушіння зерна.

**Abstract.** Energy efficiency of grain drying equipment is becoming an important task due to significant energy consumption during grain drying, especially seed drying, and rising energy prices. Heat pump drying is a promising method that requires improvement of control algorithms to achieve a balance between energy efficiency and technical capabilities of the equipment. Literature review has established that existing researches of the agricultural products heat pump drying process have not sufficiently studied the issues of the mutual influence of process parameters, external disturbances and dynamic characteristics of the heat pump. This research proposes to solve the problem by structural and parametric identification of the heat pump as a control object. For this purpose, a technological diagram of the grain heat pump drying process in a modified continuous grain dryer manufactured in France has been compiled. Experimental research of the parameters of the heat pump as part of the grain dryer has been carried out. In particular, static and dynamic characteristics of the heat pump were obtained through the channels for controlling the thermal and moisture parameters of the drying agent when changing the control influences. The obtained characteristics allowed to assess the mutual influence of the heat pump operating parameters: the boiling and condensation temperatures of the refrigerant,



*the position of the thermal expansion valve and the compressor performance on the controlled coordinates: the temperature and moisture content of the drying agent. Based on these data, a parametric diagram of the heat pump was developed, which includes two direct control channels, two cross-couplings and two disturbance channels. It was established that for all channels in the operating range of temperatures and moisture content of the drying agent, the heat pump can be described quite accurately by linear differential equations and has self-leveling properties. The obtained experimental data allowed us to identify mathematical models of control channels, controlled disturbances and cross-couplings in the form of first and second order transfer functions. The developed models can serve as the basis for creating a simulation model of a grain dryer with a heat pump as a control object and developing energy-efficient algorithms for controlling the main parameters of the heat pump grain drying process.*

**Ключові слова:** зерносушарка, тепловий насос, статичні характеристики, динамічні характеристики, математична модель

**Keywords:** grain dryer, heat pump, static characteristics, dynamic characteristics, mathematical model

**Вступ.** Наразі в Україні та світі гостро відчувається необхідність створення та розробки зерносушильного обладнання з високою ефективністю, яке дозволяє мінімізувати енерговитрати та забезпечити високу схожість насіння. Для видалення 70–80 кг вологи з однієї тони зерна в середньому потрібно значна кількість енергії, що при врожаї в 35–40 млн тон становить від 0,4 до 0,7 млн тон умовного палива [1]. Для сушіння насіннєвого зерна витрати тепла приблизно на 30% більші, ніж для продовольчого чи технічного зерна, що зумовлено вимогами до якості насіння. Питання енергозбереження стають ще актуальнішими на тлі зростання цін на енергоносії.

Одним із перспективних підходів є використання методу теплонасосного сушіння (ТНС) [2], який сприяє розробці енергоефективних та екологічно безпечних технологічних агрегатів для обробки зерна. Однак, обмеження, накладені на функціонування таких технологічних агрегатів, як сушильна камера (СК) та тепловий насос (ТН), вступають в протиріччя з їх ефективними режимами роботи.

Для розв'язання зазначеного протиріччя можливе удосконалення алгоритмів керування процесами, які протікають у ТН, що неможливо без його попередньої структурної та параметричної ідентифікації. Застосування вдосконалених алгоритмів керування допоможе знайти компроміс між енергоефективністю та технічними можливостями ТНС зерна.

Отже розробка структури та ідентифікація параметрів теплового насосу як об'єкту керування у складі зерносушарки є актуальною науково-технічною задачею.

**Аналіз літературних даних і постановка проблеми.** ТНС присвячено багато різноманітних досліджень. В роботі [3] розглянуті процеси сушіння сільськогосподарської продукції в сушарках з ТН, проведена оцінка ключових показників ефективності, впливу на харчовий колір і вміст, техніко-економічних, ексергоекономічних та екологічних показників. Дані дослідження підтверджують високі значення коефіцієнту енергетичної ефективності та коефіцієнту питомої швидкості відведення вологи, а також значного зниження споживання енергії до 80% із застосуванням ТН у порівнянні з традиційними методами сушіння.

У [4] проведений аналіз енергетичної ефективності сушильних машин з ТН та проведено комплексне порівняння різних допоміжних систем ТНС, таких як інфрачервоні, ультразвукові та сонячні технології. Встановлено, що використання сонячної енергії в поєднанні з ТНС покращують ефективність використання тепла на 86,6% і скорочує час сушіння та споживання енергії на 18,5% і 26,2% відповідно. Зазначені дослідження підкреслюють потенціал енергозбереження та покращену продуктивність технології ТНС.

Для підтвердження ефективності ТНС багатьма авторами [5-7] проводилася структурно-параметрична ідентифікація та моделювання режимів роботи теплонасосних сушарок. Зокрема, у [5] проведений термодинамічний аналіз роботи ТН у складі сушарки та визначені показники ефективності. Також наведені вирази для основних показників процесу сушіння: температури, вологості та потоку сушильного агента, перепаду тиску на компресорі, сушильного навантаження, холодопродуктивності випарника та теплопродуктивності конденсатора тощо. Зазначено, що ці параметри взаємопов'язані часто нелінійними залежностями.

Автори роботи [6] для дослідження процесів сушіння сільськогосподарської продукції пропонують використовувати кінетичні моделі. Головним недоліком таких моделей є їх неуніфікованість. На роботу кінетичних моделей впливає безліч параметрів, включаючи постійні емпіричні коефіцієнти. Загалом такі моделі застосовані лише для приблизної статистичної оцінки параметрів процесу сушіння і не можуть бути використані при побудові алгоритмів керування.

У [7] була запропонована досить проста динамічна модель процесу ТНС з ідентифікацією основних параметрів сушіння. Незважаючи на ефективність такої моделі, вона відображає процеси, що протікають лише у СК, та не враховує динамічні показники теплового насосу, а також вплив зовнішніх неконтрольованих збурень.

Підсумовуючи наведений огляд, можна зазначити, що дослідниками процесу ТНС сільськогосподарської продукції недостатньо уваги приділяється урахуванню перехресного впливу основних параметрів, як СК, так й ТН, дії зовнішніх збурень та динамічним характеристикам ТН. Для розв'язання поставленої проблеми в даній роботі пропонується провести структурну та параметричну ідентифікацію ТН як об'єкту керування у складі зерносушарки неперервної дії типу SBC виробництва Франції.

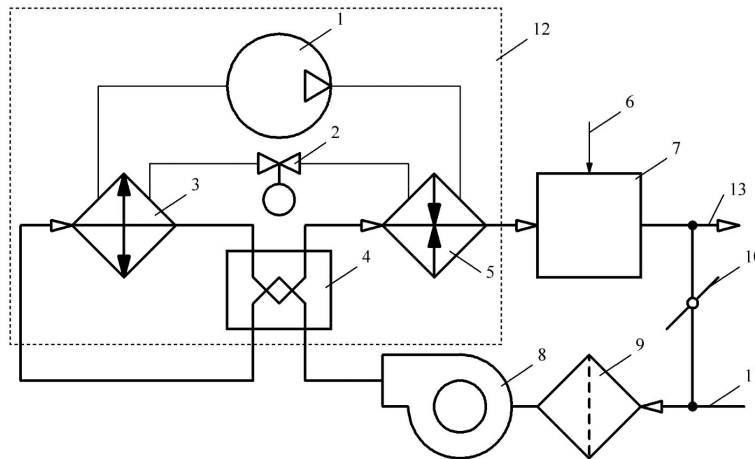


**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є проведення структурно-параметричної ідентифікації та розробка моделей основних каналів керування, перехресних зв'язків та контрольованих збурень ТН у процесі ТНС зерна. Дані моделі будуть слугувати основою для створення імітаційної моделі зерносушарки з ТН як об'єкту керування та розробки ефективних алгоритмів керування процесом ТНС.

Для досягнення поставленої мети в роботі пропонується виконати низку завдань:

1. Отримати статичні та динамічні залежності основних параметрів ТН на основі експериментальних даних.
2. Побудувати структурно-параметричну схему ТН як об'єкту керування.
3. Провести параметричну ідентифікацію моделей основних каналів керування, перехресних зв'язків та контрольованих збурень ТН.

**Методи і матеріали досліджень.** Дослідження проводилися у модифікованій зерносушарці неперервної дії з ТН типу SBC виробництва Франції [8], розташованій у с. Білозір'я Черкаської області. Технологічна схема процесу ТНС зерна представлена на рис. 1.



- 1 – компресор; 2 – терморегулюючий вентиль; 3 – випарник; 4 – рекупераційний теплообмінник; 5 – конденсатор; 6 – подача зерна; 7 – сушильна камера; 8 – циркулюючий вентилятор; 9 – фільтр; 10 – засувка; 11 – подача повітря з навколишнього середовища; 12 – тепловий насос; 13 – відпрацьоване повітря

**Рис. 1 – Технологічна схема процесу теплонасосного сушіння зерна**

**Fig. 1 – Technological diagram of the grain heat pump drying process**

Працює схема наступним чином. Зовнішнє повітря 11 змішується з відпрацьованим 13, яке подається через засувку 10 з СК 7. Сформований таким чином сушильний агент (СА) пропускається через механічний фільтр 9 та за допомогою циркулюючого вентилятора 8 подається до рекупераційного теплообмінника 4, де відбувається його попереднє охолодження. Після теплообмінника 4 СА проходить через випарник 3, який здійснює зневоложення повітря за рахунок його охолодження до точки роси. Після випарника 3 СА знову пропускається через рекупераційний теплообмінник 4, де частково відновлює свій температурний потенціал, та подається до конденсатора 5. У конденсаторі 5 відбувається підігрів СА до заданої температури. Після конденсатора 5 СА із заданими значеннями температури та вологості подається до СК 7, де відбувається процес сушіння насіння 6.

Виходячи з наведеної вище технологічної схеми, структуру зерносушарки як об'єкту керування можна розділити на дві пов'язані частини: ТН, де відбувається процес підготовки СА, та СК, де встановлюються тепловологісні параметри насіння ріпаку. Слід зазначити, що дослідження параметрів ТН як об'єкту керування досить широко представлені в літературі, тому доцільно скористатися існуючими розробками. Наприклад, у [9, 10] проведена параметрична ідентифікація та представлена параметрична схема ТН у складі процесу утилізації тепла пароповітряних сумішей. Зазначено, що для ефективної роботи ТН необхідно передбачити щонайменше два контури керування: контур керування ступенем завантаженості випарника та контур керування продуктивністю конденсатора.

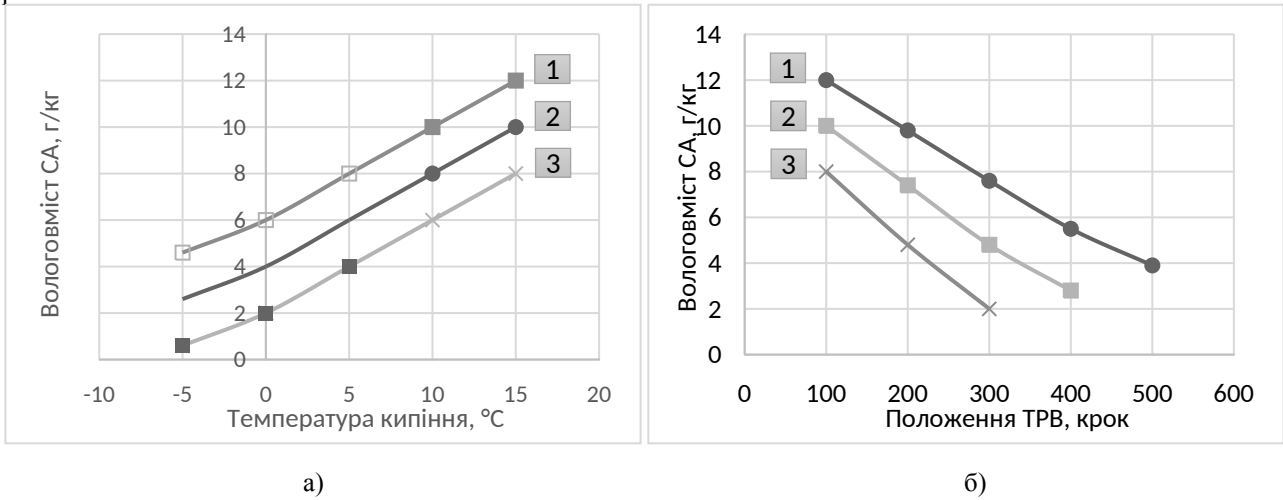
Ступінь завантаженості випарника ТН визначається температурою перегріву парів холодоагенту на виході випарника, яка у свою чергу обчислюється як різниця між температурою парів холодоагенту на виході випарника та температурою (тиском) кипіння холодоагенту. Керуючим впливом цього контуру є ступінь відкриття терморегулюючого вентиля (ТРВ). Продуктивність конденсатора ТН визначається кількістю теплоти, що віддається, яке залежить від температури (тиску) конденсації. Керуючим впливом є частота обертання двигуна компресора.

Режим роботи ТН у складі зерносушарки має свої особливості, які впливають на вибір регульованих координат та збурень наведених вище контурів керування. Для урахування зазначених особливостей були



проведені експериментальні дослідження параметрів ТН у складі зерносушарки по каналам керування температури та вологовмісту СА, результати яких розглядаються нижче.

**Результати досліджень.** Статичні характеристики ТН по каналу керування вологовмістом СА наведені на рис. 2.



**Рис. 2 – Статичні характеристики ТН по каналу керування вологовмістом СА**  
**Fig. 2 – Static characteristics of a heat pump via the drying agent moisture content control channel**

На рис. 2а представлені залежності вологовмісту СА від температури кипіння холодоагенту у випарнику при сталому значенні температури конденсації 60 °C та трьох значеннях вологовмісту СА, який подається циркулюючим вентилятором до випарника: 1 – 16 г/кг; 2 – 14 г/кг; 3 – 12 г/кг. З даних характеристик видно, що вологовміст СА після випарника у робочому діапазоні температур кипіння холодоагенту від 0 °C до 15 °C практично лінійно залежить від температури кипіння, яка у свою чергу обумовлена положенням ТРВ. На рис. 2б зображені залежності вологовмісту СА від положення ТРВ при тих же самих значеннях початкового вологовмісту СА та температури конденсації. Дані залежності також є лінійними в діапазоні зміни положення ТРВ від 100 до 400 кроків.

На рис. 3 наведені часові характеристики: 1 – вологовмісту СА, г/кг; 2 – температури СА після конденсатора, °C, як реакцію системи на ступінчасту зміну положення ТРВ у момент часу 100 с при сталій температурі конденсації 60 °C. Значення зміни положення ТРВ з кроковим електроприводом складало 100 кроків. З отриманих часових характеристик видно, що під час перехідного процесу значення вологовмісту та температури СА поступово знижувалися та через 8 хв встановилися на новому рівні.



**Рис. 3 – Динамічні характеристики ТН при зміні положення ТРВ**  
**Fig. 3 – Dynamic characteristics of the heat pump when changing the position of the thermal expansion valve**



Статичні характеристики ТН по каналу керування температурою СА наведені на рис. 4.

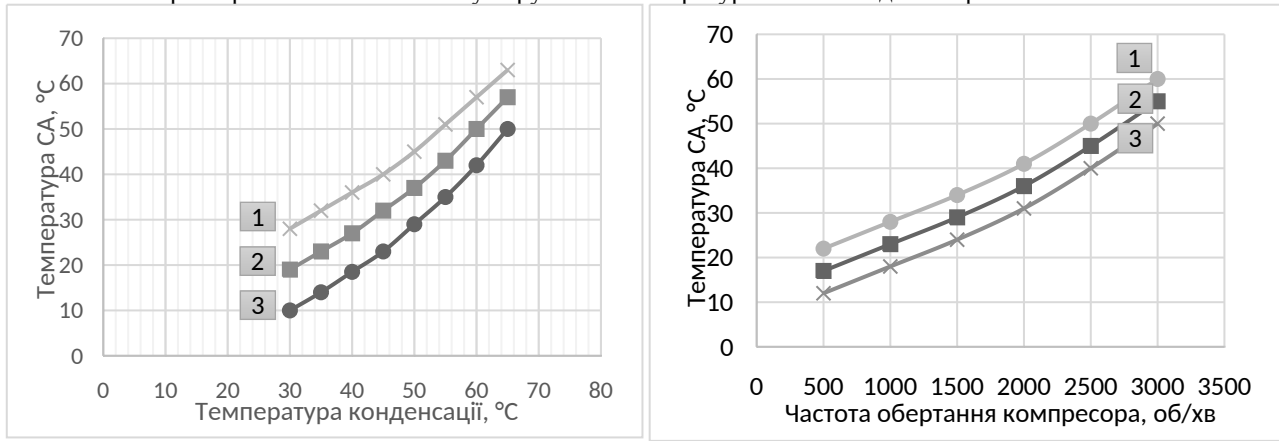


Рис. 4 – Статичні характеристики ТН по каналу керування температурою СА

Fig. 4 – Static characteristics of a heat pump via the drying agent temperature control channel

На рис. 4а зображені залежності температури СА від температури конденсації ТН при сталій температурі кипіння випарника  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  та різних значеннях початкової температури СА, який подається у систему циркулюючим вентилятором: 1 –  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Характер наведених кривих дозволяє стверджувати, що залежність температури СА від температури конденсації практично лінійна, особливо в діапазоні температур конденсації від  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На рис 4б наведені залежності температури СА від частоти обертання двигуна компресора ТН при тих же самих умовах. Характер цих залежностей також близький до лінійного.

Часові характеристики на рис. 5 відповідають реакції системи на стрибкоподібну зміну частоти обертання компресора з  $1800\text{ об/хв}$  до  $2400\text{ об/хв}$  при сталій температурі кипіння  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ : крива 1 – вологовміст СА, г/кг; крива 2 – температура СА,  $^{\circ}\text{C}$ . З наведених характеристик видно, що зі збільшенням частоти обертання двигуна компресора температура СА поступово зростає, а його вологовміст знижується. При цьому значення температури СА встановлюється на новому рівні через 9 хв, а значення вологовмісту СА – через 8 хв.

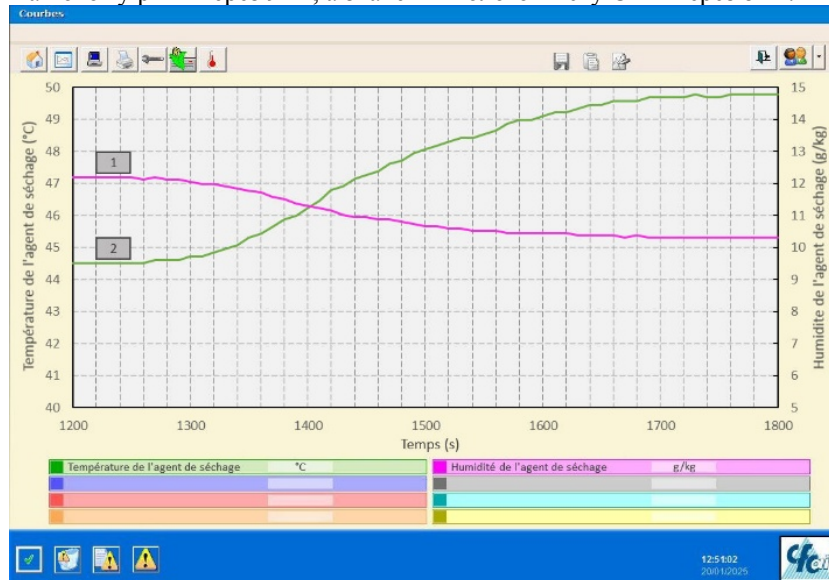


Рис. 5 – Динамічні характеристики ТН при зміні продуктивності компресора

Fig. 5 – Dynamic characteristics of the heat pump when changing the compressor production

**Обговорення результатів.** Аналіз статичних та динамічних характеристик свідчить про практично лінійну залежність тепловологісних характеристик СА від параметрів ТН у робочому діапазоні температур кипіння та конденсації холодоагенту. Це дозволяє виділити два головних канали керування:

1. положення ТРВ – вологовміст СА;
2. частота обертання двигуна компресора – температура СА.

Тепловологісні параметри СА на виході з ТН суттєво залежать від початкових значень цих параметрів при подачі СА до випарника. Як видно з рис. 2, зміна початкового значення вологовмісту СА на  $2\text{ г/кг}$  призводить до аналогічної зміни значення вологовмісту на виході з ТН. У свою чергу зміна початкової температури СА на  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  викликає пропорційну зміну кінцевої температури СА, як це слідує з рис. 4. Зазначена залежність свідчить про



досить сильний вплив збурень за обома каналами керування: початкової температури та вологовмісту СА, який подається циркулюючим вентилятором до ТН.

Аналіз динамічних характеристик ТН показує, що керуючі дії: положення ТРВ та частота обертання двигуна компресора суттєво впливають на обидві регульовані координати: температуру та вологовміст СА, оскільки температура кипіння та конденсації холодоагенту є складними нелінійними функціями декількох параметрів ТН. Це призводить до появи сильних перехресних зв'язків між двома каналами керування.

Зазначені міркування дають змогу побудувати параметричну схему ТН у складі зерносушарки (рис. 6).

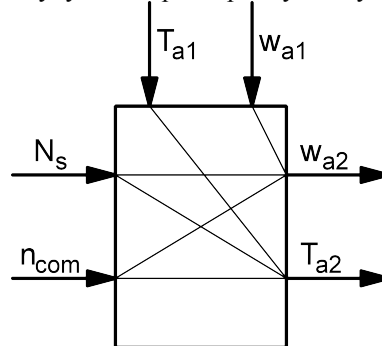


Рис. 6 – Параметрична схема ТН у складі зерносушарки

Fig. 6 – Parametric diagram of the heat pump as part of the grain dryer

На схемі позначено:  $N_s$  – положення ТРВ, крок;  $n_{com}$  – частота обертання двигуна компресора, об/хв;  $T_{a1}$  – початкова температура СА, °С;  $w_{a1}$  – початковий вологовміст СА, г/кг;  $T_{a2}$  – температура СА після ТН, °С;  $w_{a2}$  – вологовміст СА після ТН, г/кг.

Характер статичних та динамічних характеристик свідчить про те, що по всіх каналах перетворення координатних дій ТН як об'єкт керування володіє властивістю самовирівнювання та може бути описаний лінійними диференційними рівняннями. Існують різноманітні види математичного описання процесів, що протікають у ТН, але на практиці найбільше поширення здобули моделі у вигляді передатних функцій. Враховуючи той факт, що ТН відноситься до класу теплових об'єктів, доцільно описувати канали перетворення координатних дій (рис. 6) передатними функціями першого та/або другого порядку. Використовуючи методику, викладену у [11], по наявним перехідним динамічним характеристикам (рис. 3, 5) були отримані передатні функції першого та другого порядку по всіх каналах ТН як об'єкту керування, які наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Математичні моделі каналів ТН як об'єкту керування

Канал	Модель першого порядку	Модель другого порядку
Канали керування		
$N_s - w_{a2}$	$\frac{-0,028e^{-95s}}{132s + 1}$	$\frac{-0,028e^{-45s}}{(88s + 1)^2}$
$n_{com} - T_{a2}$	$\frac{0,0088e^{-137s}}{128s + 1}$	$\frac{0,0088e^{-60s}}{(107s + 1)^2}$
Перехресні зв'язки		
$N_s - T_{a2}$	$\frac{-0,0448e^{-79s}}{119s + 1}$	$\frac{-0,0448e^{-32s}}{(85s + 1)^2}$
$n_{com} - w_{a2}$	$\frac{-0,00315e^{-112s}}{118s + 1}$	$\frac{-0,00315e^{-47s}}{(92s + 1)^2}$
Канали контрольованих збурень		
$T_{a1} - T_{a2}$	$\frac{0,75e^{-80s}}{226s + 1}$	$\frac{0,75e^{-16s}}{(150s + 1)^2}$
$w_{a1} - w_{a2}$	$\frac{0,69e^{-91s}}{269s + 1}$	$\frac{0,69e^{-21s}}{(174s + 1)^2}$

Представлені в табл. 1 передатні функції досить адекватно описують динамічні властивості ТН по основним каналам перетворення координатних дій: коефіцієнт детермінації для моделей першого порядку не менш ніж 0,9; для моделей другого порядку не менш ніж 0,95.

**Висновки.** У результаті проведених досліджень побудовані статичні та динамічні характеристики ТН у складі зерносушарки. Проведена структурно-параметрична ідентифікація ТН як об'єкту керування дозволило виділити два канали керування тепловолігнісними параметрами СА, два перехресні зв'язки та два канали контрольованих



збурень. Отримані передатні функції виділених каналів перетворення координатних дій з високою точністю описують динамічні властивості ТН та можуть слугувати основою для розробки імітаційної моделі та дослідження режимів роботи процесу теплонасосного сушіння зерна.

Наявність сильних перехресних впливів керуючих дій та збурень внаслідок взаємної нелінійної залежності параметрів ТН свідчить про необхідність розробки ефективних алгоритмів керування, що потребує подальших досліджень.

#### Список використаних джерел

1. Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна / Ю. Снежкін та ін. Київ : ТОВ «ПоліграфСервіс», 2012. 154 с.
2. Kizurov A. Modernization of the heat pump installation for drying wheat. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1614, no. 1. 012068.
3. Uthpala T. G. G., Navaratne S. B., Thibbotuwawa A. Review on low-temperature heat pump drying applications in food industry: Cooling with dehumidification drying method. *Journal of Food Process Engineering*. 2020. Vol. 43, no. 10. e13502.
4. Recent developments in heat pump dryers focusing on methods of supplying and reducing their energy consumption / M. Deymi-Dashtebayaz et al. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024. Vol. 149, no. 17. P. 9751–9775.
5. Peng Z. R., Wang G. B., Zhang X. R. Thermodynamic analysis of novel heat pump cycles for drying process with large temperature lift. *International Journal of Energy Research*. 2019. Vol. 43. P. 3201–3222.
6. Mathematical modeling and performance analysis of direct expansion heat pump assisted solar drying system / W. Hao et al. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 165. P. 77–87.
7. Modelica-based modelling of heat pump-assisted apple drying for varied drying temperatures and bypass ratios / M. Jokiel et al. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. Vol. 19. 100575.
8. *Uscatoare continue cu tablou automatizat HMI*. 2nd ed. Tricot : Cfcrai, 2018. 129 p.
9. Ковальчук Д. А., Мазур О. В., Хобін В. А. Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: результати експериментів, структурна та параметрична ідентифікація основних каналів об'єкту. *Автоматизація технологічних та бізнес-процесів*. 2019. Т. 11, № 1. С. 32–42.
10. Ковальчук Д. А., Мазур О. В., Гудзь С. С. Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: лабораторна установка, вимірювані змінні, автоматизація експериментів. *Автоматизація технологічних та бізнес-процесів*. 2018. Т. 10, № 2. С. 64–72.
11. V. A. Hobin, *Sistemy garantirujushhego upravlenija tehnologicheskimi agregatami: osnovy teorii, praktika primenenija*. Odessa: TJeS, 2008..

#### References

- [1] Yu. Sniezkin, V. Paziuk, Zh. Petrova ta D. Chalaiev, *Teplonasosna zernosusharka dlia nasinnievoho zerna*. Kyiv: TOV PolihrafServis, 2012.
- [2] A. Kizurov, “Modernization of the heat pump installation for drying wheat”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1614, no. 1, 2020, Art. no. 012068.
- [3] T. G. G. Uthpala, S. B. Navaratne and A. Thibbotuwawa, “Review on low-temperature heat pump drying applications in food industry: Cooling with dehumidification drying method”, *J. Food Process Eng.*, vol. 43, no. 10, 2020, Art. no. e13502.
- [4] M. Deymi-Dashtebayaz, A. Mostafa, M. Asadi, D. Hosseinzadeh, J. Khutornaya and O. Sergienko, “Recent developments in heat pump dryers focusing on methods of supplying and reducing their energy consumption”, *J. Thermal Anal. Calorimetry*, vol. 149, no. 17, pp. 9751–9775, Sep. 2024.
- [5] Z. R. Peng, G. B. Wang and X. R. Zhang, “Thermodynamic analysis of novel heat pump cycles for drying process with large temperature lift”, *Int. J. Energy Res.*, vol. 43, pp. 3201–3222, 2019.
- [6] W. Hao, H. Zhang, S. Liu, B. Mi and Y. Lai, “Mathematical modeling and performance analysis of direct expansion heat pump assisted solar drying system”, *Renew. Energy*, vol. 165, pp. 77–87, Mar. 2021.
- [7] M. Jokiel, M. Bantle, C. Kopp ta E. Halvorsen Verpe, “Modelica-based modelling of heat pump-assisted apple drying for varied drying temperatures and bypass ratios”, *Thermal Sci. Eng. Prog.*, vol. 19, Oct. 2020, Art. no. 100575.
- [8] *Uscatoare continue cu tablou automatizat HMI*, 2nd ed. Tricot: Cfcrai, 2018.
- [9] D. A. Kovalchuk, O. V. Mazur ta V. A. Khobin, “Doslidzhennia protsesiv utylizatsii tepla paropovitrianykh sumishei: rezultaty eksperymntiv, strukturna ta parametrychna identyfikatsiia osnovnykh kanaliv obiekту”, *Avtomatyzatsiia tekhnol. ta biznes-protsesiv*, t. 11, № 1, s. 32–42, 2019.
- [10] D. A. Kovalchuk, O. V. Mazur ta S. S. Hudz, “Doslidzhennia protsesiv utylizatsii tepla paropovitrianykh sumishei: laboratorna ustanovka, vymiruvani zminni, avtomatyzatsiia eksperymntiv”, *Avtomatyzatsiia tekhnol. ta biznes-protsesiv*, t. 10, № 2, s. 64–72, 2018.
- [11] V. A. Hobin, *Sistemy garantirujushhego upravlenija tehnologicheskimi agregatami: osnovy teorii, praktika primenenija*. Odessa: TJeS, 2008.

Отримана в редакції 12.06.2025. Прийнята до друку 18.06.2025. Received 12 June 2025. Approved 18 June 2025. Available in Internet 30 June 2025