

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА



Науковий вісник НЛТУ України
Scientific Bulletin of UNFU

<https://doi.org/10.36930/40360420>

Article received: 24.06.2026

Article accepted: 21.08.2026

Article published: 24.09.2026

Correspondence author: V. S. Melnyk melnikvs@ukr.net

ISSN 1994-7836 (print)
ISSN 2519-2477 (online)



UDC 66.047:681.5

В. С. Мельник, Я. В. Смітюх

Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

КОМПЛЕКСНА АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СИРОВИНИ В КОНВЕКТИВНИХ КАМЕРНИХ СУШАРКАХ

Розглянуто питання автоматизації технологічного процесу (ТП) сушіння сировини в конвективних камерних сушарках. Запропоновано модель комплексної системи автоматизації таких сушарок, яка поєднує підсистеми керування температурою повітря в камері сушарки, циркуляцією сушильного агента, вологовидаленням із камери сушарки та програмного керування ТП. Технологічна програма сушіння сировини складається із семи кроків, у кожному з яких задаються час переходу від попереднього кроку та остаточні задані значення температури та абсолютної вологості повітря в камері сушарки. Для відпрацювання температурного завдання використовується дворежимне керування температурою повітря в камері сушарки з нейромережним визначенням моменту перемикання режимів та ініціалізацією ПІД-регулятора. У режимі інтенсивної зміни температури на нагрівач подається максимальний керівний вплив, що забезпечує швидке наближення температури повітря в камері до заданого значення. Перемикання до режиму стабілізації температури повітря виконується з урахуванням інерційного вибігу температури, після чого підтримання заданого значення температури здійснюється ПІД-регулятором. Такий підхід до керування сушаркою забезпечує швидкий перехід між температурними режимами, високу якість стабілізації температури та зменшення або усунення перерегулювання. Для формування завдання швидкості обертання лопатей основного вентилятора застосовано нечітку логіку, що враховує температуру в камері, відносну масу завантаженої сировини від початку процесу її сушіння та завантаженість сушарки відносно номінального значення. Керування витяжним вентилятором здійснюється за допомогою ПІ-регулятора за абсолютною вологістю повітря в камері. Окремо реалізовано механізм технологічних рецептів, автоматичні блокування та сигналізацію. Наявність рецептів і людино-машинного інтерфейсу спрощує налаштування режимів сушіння, зменшує навантаження на оператора та підвищує повторюваність виконання технологічного режиму. Дослідження виконано на побудованій експериментальній конвективній камерній сушарці з мультисенсорною системою вимірювань технологічних параметрів процесу сушіння. Експериментальні дослідження із застосуванням запропонованої комплексної системи автоматизації ТП показали скорочення тривалості сушіння сировини та витрат електроенергії, що свідчить про доцільність її практичного використання для автоматизації процесу сушіння сировини в конвективних камерних сушарках.

Ключові слова: конвективна камерна сушарка; тепловий процес сушіння; мультисенсорні вимірювання параметрів процесу сушіння; алгоритм керування процесом сушіння сировини; ПІД-регулятор; нечітка логіка; штучна нейронна мережа.

Вступ / Introduction

Сушіння матеріалу чи сировини є одним із найпоширеніших технологічних процесів у харчовій, переробній, агропромисловій та інших галузях промисловості. Для багатьох видів продуктів сушіння є основною технологічною операцією, від якої залежить якість готового продукту та економічна ефективність виробництва.

Серед різних способів сушіння сировини значного поширення набуло конвективне сушіння, під час якого

теплота до продукту передається потоком нагрітого сушильного агента. Конвективні камерні сушарки використовуються для сушіння сировини, яка розміщується на лотках, сітках або стелажах, і є зручними для виробництв із постійною зміною асортименту продукції, для невеликих партій сировини та для реалізації різних режимів сушіння. Для таких установок характерна технологічна гнучкість, вони мають відносно просту конструкцію та порівняно невисоку вартість.

Для конвективної камерної сушарки як об'єкта керування характерні інерційність, нелінійність та вплив ке-

© Copyright 2026 by the author(s)

Мельник Володимир Сергійович, аспірант, кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

ім. проф. А. П. Ладанюка. Email: melnikvs@ukr.net; <https://orcid.org/0009-0005-3477-9344>

Смітюх Ярослав Володимирович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління ім. проф. А. П. Ладанюка. Email: smityuh1@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5411-3284>

Цитування за ДСТУ: Мельник В. С., Смітюх Я. В. Комплексна автоматизація технологічного процесу сушіння сировини в конвективних камерних сушарках. Науковий вісник НЛТУ України. 2026, т. 36, № 4. С. 178–187.

Citation APA: Melnyk, V. S., & Smityukh, Ya. V. Comprehensive automation of the technological drying process in chamber convective dryers. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(4), 178–187. <https://doi.org/10.36930/40360420>

рівних дій одночасно на різні контрольовані параметри процесу. На перебіг процесу сушіння впливають вид сировини, її попередня підготовка, початкова маса завантаження сировини, початковий вологовміст та характер розміщення на лотках. У процесі сушіння сировини змінюються температура і вологість у камері, маса та температура завантаженої сировини, а також її фізико-механічні та теплофізичні властивості. Окрім цього, процес сушіння сировини найчастіше є тривалим, а його загальний результат оцінюється не тільки за дотриманням основних технологічних параметрів, а й за енергоефективністю, стабільністю та повторюваністю результатів. Тому процес сушіння сировини є складним для керування ним, особливо за умов ручного ведення ТП, що досить часто застосовується на практиці. Недостатній рівень автоматизації сушарок призводить до залежності перебігу ТП від досвіду оператора, збільшення ймовірності помилок, нераціонального використання енергії та нестабільної якості продукції.

Автоматизація конвективних камерних сушарок є *актуальним науково-практичним завданням*, вирішення якого дасть змогу зменшити вплив людського фактора, забезпечити стабільність виконання заданого технологічного режиму, отримати високу якість готової продукції та підвищити ефективність ТП сушіння сировини загалом.

Об'єкт дослідження – автоматизація технологічного процесу сушіння сировини в конвективних камерних сушарках.

Предмет дослідження – структура, принципи побудови та методи реалізації комплексної автоматизації процесу сушіння сировини в конвективних камерних сушарках, які забезпечать стабільність виконання заданого технологічного режиму задля отримання якісної готової продукції.

Мета роботи – розробити комплексну систему автоматизації процесу сушіння сировини в конвективних камерних сушарках, яка поєднуватиме підсистеми керування температурою повітря в камері сушарки, циркуляцією сушильного агента, вологовидаленням із камери сушарки та програмно-логічне керування технологічним процесом сушіння.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі *основні завдання дослідження*:

- визначити основні завдання керування ТП сушіння сировини в конвективних камерних сушарках, що створить основу для загальної структури комплексної автоматизації процесу сушіння сировини;
- розробити структуру комплексної системи автоматизації конвективних камерних сушарок, що міститиме всі потрібні функціональні складові для керування ТП сушіння сировини та формуватиме основу для технічної реалізації системи автоматизації;
- вибрати доцільні принципи керування ТП сушіння сировини для окремих завдань і підсистем, що дасть змогу врахувати їх особливості для забезпечення ефективного керування ним;
- практична реалізація комплексної системи автоматизації ТП на експериментальній конвективній камерній сушарці, що дасть змогу оцінити працездатність запропонованих рішень і їх придатність для практичного використання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних дослідженнях автоматизації ТП сушіння сировини розглядають як традиційні методи автоматичного

регулювання, так і сучасні інтелектуальні методи керування ТП сушіння сировини. У роботі [2] розглянуто розроблення системи автоматичного регулювання температури повітря в камерній сонячній сушарці для лікарської рослинної сировини з використанням електричної енергії від сонячних панелей для додаткового підігріву. Виконавчими елементами системи є електричний нагрівач та охолоджувальний вентилятор. Як метод керування температурою повітря в камері сушарки використано ПІД-регулятор, реалізований на мікроконтролері. Система орієнтована на підтримання заданої температури повітря в камері сушарки за змінного надходження сонячної енергії. Водночас, у системі не передбачено контролю вологості повітря в камері сушарки чи вологості сировини.

У роботі [1] досліджено кінетику конвективного сушіння скибок якону та ПІД-регулювання температури повітря в сушарці. Виконавчими елементами, що впливають на температуру, є електричний нагрівач та вентилятор подачі повітря в сушарку. У процесі сушіння сировини проводяться вимірювання температури після нагрівача, на вході до камери сушіння, а також завантаження сушарки для визначення вологості сировини непрямым методом. Окремо проаналізовано вплив швидкості руху повітря на якість регулювання температури. Водночас, автоматизація обмежена контуром регулювання температури і не охоплює керування вологістю повітря в камері.

У роботі [13] досліджено систему прецизійного керування температурою повітря в камері сушарки під час сушіння скибок канталупи на основі удосконаленого нейромережевого ПІД-регулятора. Керованою технологічною змінною є температура у внутрішній камері сушарки, а методом керування температурою повітря є нейромережеве ПІД-регулювання, у якому нейронна мережа налаштовує параметри ПІД-регулятора. Виконавчим елементом є керований інфрачервоний нагрівач. Швидкість повітряного потоку та відкриття клапана випуску вологого повітря задають вручну. У роботі порівняно звичайний ПІД-регулятор, нейромережевий ПІД-регулятор й удосконалений нейромережевий ПІД-регулятор. Показано, що перевагою ПІД-регуляторів із нейромережевими налаштуваннями є підвищена точність регулювання температури повітря за умов змінних температурних режимів сушіння.

У роботі [10] досліджено регулювання температури повітря в камерній сонячній сушарці з накопиченням енергії. Вимірюються температура та вологість повітря в камері сушарки. Керівний вплив на температуру реалізується через керований вентилятор подачі повітря з теплового акумулятора. За значенням вологості повітря здійснюється тільки сигналізація про завершення ТП сушіння сировини. Обмеженням роботи є орієнтація тільки на завдання регулювання температури повітря в сонячній сушарці без керування вологовидаленням.

У роботі [11] розглянуто систему керування камерною сонячною сушаркою для листя подорожника. Керування вентилятором подачі повітря в сушарку здійснювалося на основі нечіткої логіки типу Мамдані залежно від температури та вологості повітря в сушарці за змінних кліматичних умов, насамперед коливань сонячної радіації та температури навколишнього середовища. Нечітке керування сушаркою, порівняно із традиційним ПІД-регулюванням, дало змогу скоротити три-

валість процесу сушіння сировини та зменшити витрати допоміжної енергії на електропривод вентилятора подачі повітря.

У роботі [12] досліджено камерну сонячну сушарку з акумулятором теплової енергії, для якої було реалізовано систему інтелектуального керування. У системі вимірювалися сонячна радіація, температура навколишнього повітря, а також температура і відносна вологість повітря сушильного агента на вході до та виході із сушильної камери. Керівними діями були ступені відкриття клапана сонячної панелі, клапана теплового акумулятора та клапана рециркуляції повітря. Алгоритм керування сушаркою складався з двох нечітких регуляторів: перший визначав ступінь відкриття клапанів сонячної панелі та теплового акумулятора за значеннями сонячної радіації і температури навколишнього повітря, а другий регулював відкриття клапана рециркуляції за відносною вологістю повітря на виході із сушильної камери. Завдяки цьому система автоматично перерозподіляла повітряні потоки між сонячною панеллю, акумулятором тепла та контуром рециркуляції залежно від погодних умов і стану сушильного агента. Експериментальні результати дослідження показали підвищення ефективності роботи сушарки за використання інтелектуального керування.

У роботі [4] досліджено конвективне сушіння імбиру в камерній сушарці з примусовою циркуляцією гарячого повітря. У системі вимірювалися температура та швидкість сушильного повітря, втрата маси сировини вимірювалась електронними вагами. Початкову вологість імбиру було виміряно з використанням інфрачервоного вологоміра. Виконавчими елементами були керований електричний нагрівач та циркуляційний вентилятор зі сталою швидкістю обертання лопатей вентилятора. Автоматичне керування сушаркою в роботі обмежувалося ПД-регулюванням температури, тоді як основний акцент дослідження було зроблено на експериментальному визначенні кінетики сушіння сировини та математичному моделюванні кривих сушіння сировини.

Отже, здійснений аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що найпоширенішим завданням автоматичного керування конвективними камерними сушарками залишається ПД-регулювання окремих технологічних параметрів. Водночас, зростає кількість публікацій, у яких використовують нечітку логіку та нейромережеві регулятори.

Матеріали та методи дослідження. У роботі системно проаналізовано ТП сушіння сировини в конвективній камерній сушарці для визначення складу вимірюваних змінних, керівних впливів, технологічних завдань та обмежень. Результати цього аналізу стали основою для виокремлення основних завдань керування конвективною камерною сушаркою, які мають бути автоматизовані. Для побудови загальної структури комплексної системи автоматизації застосовано системний підхід, що дав змогу розглядати систему як сукупність взаємопов'язаних функціональних складових, призначених для автоматичного ведення ТП сушіння сировини. Методологічною основою для вибору принципів керування сушаркою були методи класичної та сучасної теорії автоматичного керування ТП сушіння сировини, зокрема – методи автоматичного регулювання та інтелектуальні методи керування ТП сушіння сировини. Отримання навчальних даних для нейромереж та оці-

нювання працездатності запропонованої комплексної системи автоматизації ТП проводилось із використанням експериментальної конвективної камерної сушарки із мультисенсорною вимірювальною системою. Формування нейромереж здійснювалось в MATLAB з використанням вбудованих засобів. Навчання нейромереж проводилось із використанням алгоритму зворотного поширення помилки з баєсівською регуляризцією.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Для побудови комплексної системи автоматизації конвективної камерної сушарки насамперед потрібно встановити функціональні завдання, які мають бути автоматизовані. Вони визначаються конструкцією сушарки, складом виконавчих механізмів, наявними вимірювальними каналами та технологічними вимогами до ведення процесу сушіння сировини.

Дослідження проводилися з використанням експериментальної конвективної камерної сушарки із закритою сушильною камерою внутрішніми розмірами 400×330×300 мм, у якій сировина розміщується на сітчастих лотках (рис. 1).

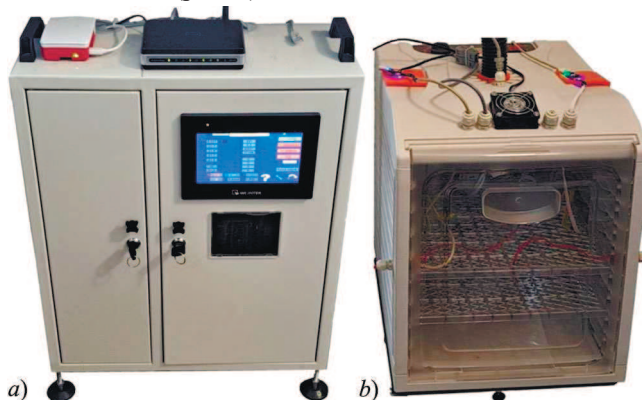


Рис. 1. Експериментальна конвективна камерна сушарка / Experimental chamber convective dryer

Для інформаційного забезпечення керування ТП сушіння сировини використовувалася мультисенсорна вимірювальна система, яка забезпечувала вимірювання:

- температури повітря в камері сушіння сировини з використанням термометра опору Pt100;
- вологості повітря в камері сушарки з використанням цифрового давача DHT22;
- температури зовнішнього повітря з використанням термометра опору Pt100;
- маси завантаженої сировини з використанням вагової платформи на трьох тензодавачах;
- споживання електричної енергії за допомогою цифрового електролічильника з комунікаційним інтерфейсом.

В експериментальній установці можливі такі керівні впливи:

- зміна потужності електричного нагрівача для формування теплового режиму в камері сушарки;
- зміна швидкості обертання лопатей основного вентилятора для забезпечення циркуляції сушильного агента в камері сушарки;
- зміна швидкості обертання лопатей витяжного вентилятора для видалення вологого повітря із камери під час сушіння сировини.

За принципом побудови експериментальна сушарка відповідає типовим промисловим камерним конвективним сушаркам (рис. 2). На принциповій схемі експериментальної сушильної установки позначено: ТЕН –

електричний нагрівач; M1 – основний вентилятор; M2 – витяжний вентилятор; TE1 – давач температури повітря в камері сушарки; ME – давач вологості повітря в камері сушарки; TE2 – давач температури зовнішнього повітря; WE – давач маси завантаженої сировини; EE – лічильник споживання електроенергії.

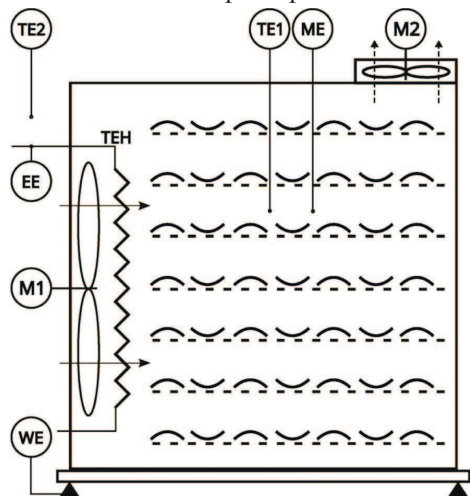


Рис. 2. Принципова схема експериментальної конвективної камерної сушарки / Schematic diagram of the experimental chamber convective dryer

Керівним пристроєм установки є одноплатний міні-комп'ютер Raspberry Pi 5, до якого через промислову мережу PROFINET під'єднана станція вводу/виводу дискретних та аналогових сигналів. Для розроблення алгоритмів керування сушаркою використовують інструментальний програмний комплекс промислової автоматизації CODESYS із підтримкою мов програмування стандарту IEC 61131-3. На Raspberry Pi 5 встановлено систему керування базами даних MariaDB для збереження інформації про хід досліджень. Відображення вимірювань технологічних змінних процесу сушіння, поточного стану установки та її налаштування здійснюються з використанням сенсорної панелі оператора Weintek cMT2078x.

Для етапів експериментального дослідження процесу сушіння сировини використовувалась різноманітна сировина: яблука, груші, м'ясо різних сортів. Перед сушінням сировина нарізувалась за допомогою слайсера на шматочки однакової товщини, які потім викладались на сітки в камері сушарки.

На підставі аналізу конструкції конвективної камерної сушарки та ТП сушіння сировини визначено основні завдання керування сушаркою, що підлягають автоматизації:

- керування температурою повітря в камері сушарки відповідно до технологічного режиму;
- керування основним вентилятором для забезпечення циркуляції повітря в камері під час сушіння сировини;
- керування витяжним вентилятором для видалення вологого повітря із камери сушарки;
- програмне ведення технологічного циклу сушіння сировини;
- автоматичні блокування і сигналізація, реєстрація технологічних даних.

На основі визначених функціональних завдань розроблено структурну схему комплексної системи автоматизації конвективної камерної сушарки (рис. 3). Одним з основних завдань є керування температурним режимом у камері сушарки. Температура в камері безпо-

середньо впливає на інтенсивність процесу сушіння сировини та якість остаточного продукту. Упродовж одного технологічного циклу завдання температури повітря в сушарці може змінюватися кілька разів. У розробленій системі керування сушаркою завдання температури формується технологічною програмою сушіння сировини, яка складається із семи кроків. У кожному кроці задаються тривалість переходу від попереднього кроку та остаточне значення температури, яке має бути досягнуте в камері сушарки. Виконавчим механізмом для керування температурою повітря в камері сушарки експериментальної установки є електричний нагрівач.



Рис. 3. Структурна схема комплексної системи автоматизації конвективної камерної сушарки / Structural diagram of the comprehensive automation system of a chamber convective dryer

Для відпрацювання технологічних завдань температури повітря в камері сушарки пропонується застосування дворежимного керування установкою, яке передбачає поєднання режиму інтенсивної зміни температури та режиму стабілізації температури (рис. 4). У першому режимі забезпечується швидке наближення температури до заданого значення шляхом подавання максимального керівного впливу на виконавчий механізм, тобто повного увімкнення або вимкнення електричного нагрівача залежно від напрямку зміни температури. Після наближення температури до заданого значення система переходить у режим ПД-регулювання, у якому теплова потужність електричного нагрівача змінюється в діапазоні 0-100 % шляхом формування ШІМ-сигналу керування твердотільним реле.

Особливістю запропонованої підсистеми керування температурою повітря в камері сушарки є використання нейромереж для підвищення якості переходу між режимами. Перша нейронна мережа використовується для визначення моменту вимкнення максимального керівного впливу так, щоб температура після вибігу за інерцією була максимально близько до заданого значення. Це дає змогу врахувати інерційність теплового об'єкта та зменшити ймовірність перерегулювання температури. Друга нейронна мережа використовується для фор-

мування початкового значення керівного впливу ПД-регулятора в момент переходу до режиму регулювання, наближеного до значення, необхідного для підтримання заданої температури.

Навчання нейромереж здійснювалось в MATLAB за експериментальними даними. Вхідними змінними навчальних вибірок були дані від мультисенсорної виміральної системи експериментальної установки. Вихідними змінними нейромереж були прогнозоване значення інерційного вибігу температури після зміни керівного впливу та значення виходу ПД-регулятора для його ініціалізації під час переходу до режиму стабілізації температури. Еталонні значення вибігу температури визначалися за експериментальними перехідними процесами як фактична зміна температури після припинення режиму інтенсивного нагрівання або охолодження. Еталонні значення для ініціалізації ПД-регулятора формувалися за результатами експериментів із фіксованими значеннями потужності нагрівача: після виходу температури в камері сушарки в усталений режим фіксували досягнуте значення температури та відповідну йому потужність нагрівача, яка надалі використовувалася як початкове значення виходу ПД-регулятора для стабілізації температури на цьому рівні. Для реалізації нейромережових модулів використовувалися багатошарові перцептрони прямого поширення сигналу із тришаровою структурою та вісьмома нейронами у прихованому шарі. Після навчання параметри навчених нейромереж використовувалися в розроблених мовою ST функціональних блоках нейромережових модулів керівного контролера для обчислень у реальному часі.

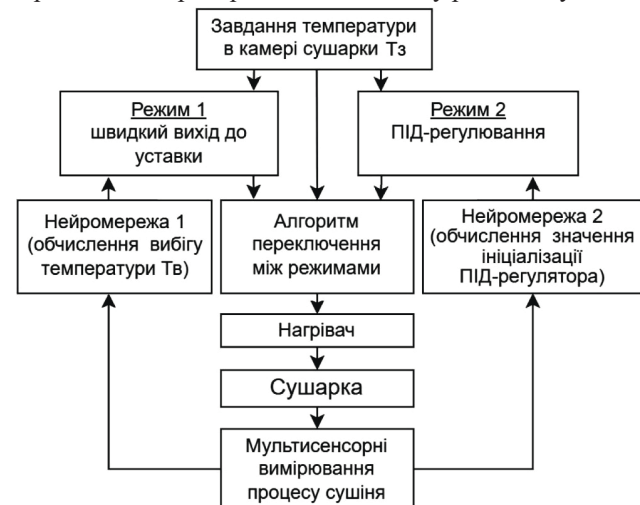


Рис. 4. Дворежимне керування температурою повітря в камері сушарки / Dual-mode air temperature control in the drying chamber

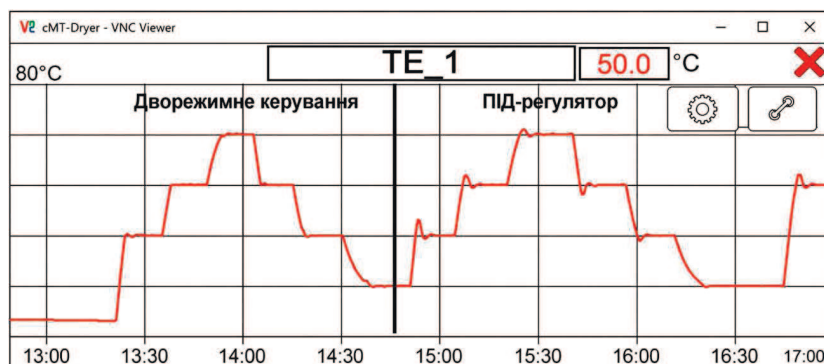


Рис. 6. Порівняння дворежимного керування та ПД-регулювання температури повітря в камері сушарки / Comparison of dual-mode control and PID control of air temperature in the dryer chamber

Налаштування дворежимного керування температурою повітря в камері сушарки здійснюється із окремого екрана сенсорної панелі керування установкою (рис. 5). У центральній частині екрана відображаються поточна температура в камері (TE_1), програмний задавач температури (Schedule). У лівій частині екрана розміщено візуальні об'єкти режиму інтенсивної зміни температури: індикатори напрямку зміни температури (Direction), керівних впливів (Boost, Break), параметри визначення моменту переходу до режиму ПД-регулювання (t_{calc} , dT_{max} , T_{overbr}), значення виходів нейромереж (MLP_1, MLP_2). У правій частині екрана наведено об'єкти режиму ПД-регулювання: поточне завдання (PID set), зона нечутливості (PID err DB), коефіцієнти налаштування (K_p , K_i , K_d), обмеження інтегральної складової та вихідного сигналу (I_{min} , I_{max} , OUT_{min} , OUT_{max}).

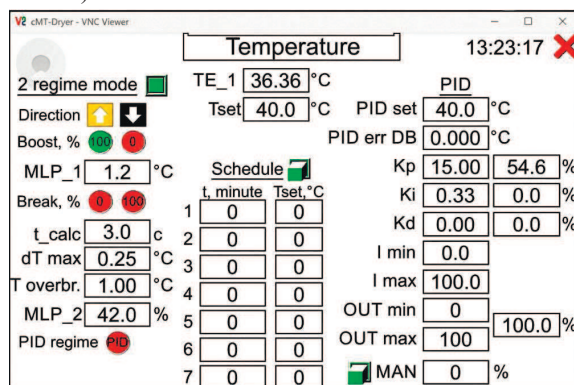


Рис. 5. Налаштування параметрів керування температурою повітря в камері сушарки / Air temperature control settings in the drying chamber

Результати експериментального дослідження показали, що застосування дворежимного керування температурою повітря в камері сушарки забезпечує швидке відпрацювання змін температурного завдання з мінімізацією перерегулювання або його відсутністю як під час підвищення, так і під час зниження температури повітря в камері сушарки (рис. 6). Іншим важливим завданням є керування циркуляцією сушильного агента в камері сушарки. Швидкість повітряного потоку впливає на рівномірність температурного поля в камері, інтенсивність тепло- і масообміну між повітрям та продуктом сушіння, швидкість відведення вологі від поверхні сировини, а також на енергетичні витрати ТП. Недостатня швидкість повітря може призводити до нерівномірного сушіння сировини та зниження інтенсивності вологовидалення, тоді як надмірна швидкість може спричинити нераціональне використання електроенергії та небажаний вплив на продукт сушіння.

Для формування завдання швидкості обертання лопатей основного вентилятора пропонується використувати нечітку логіку. Такий підхід до керування сушаркою дає змогу враховувати експертний досвід керування роботою вентилятора. У запропонованому алгоритмі завдання швидкості обертання лопатей вентилятора формується за двома основними змінними: температурою повітря в камері та відносною масою завантаженої сировини.

Для реалізації алгоритму використано нечітку логіку типу Сугено нульового порядку. Вхідні змінні описуються трьома нечіткими рівнями: низьким, середнім і високим. Кожному поєднанню рівнів температури та відносної маси відповідає правило, виходом якого є числове значення завдання швидкості обертання лопатей вентилятора. Підсумкове значення виходу нечіткого блока визначається шляхом зваженого усереднення чітких вихідних значень активованих правил. Алгоритм нечіткого формування завдання швидкості обертання лопатей основного вентилятора реалізовано у вигляді функціонального блока у програмі керівного контролера в середовищі CODESYS мовою ST.

Додатково в алгоритмі враховується завантаженість сушарки відносно її номінального завантаження сировиною. Для цього використовується коефіцієнт, який формується за значенням початкової маси завантаження сировини щодо номінального завантаження сушарки. Отримане значення виходу нечіткого блока коригується цим коефіцієнтом, після чого обмежується мінімальним і максимальним допустимими значеннями швидкості обертання лопатей вентилятора. Це дає змогу адаптувати роботу основного вентилятора як до поточного стану процесу сушіння сировини, так і до фактичної завантаженості камери.

Main fan

Input: TE_1 55.0 °C

WE 0.297 kg

Wstart 1.122 kg

WErs 26.5 %

Wrnl 74.8 %

Wrnl, % kvs, %

60	70
80	85
100	100

kvs 81 %

Fuzzy rules: °C

	T_L 40.0	T_M 50.0	T_H 60.0
Wrs_L 60	60	65	70
Wrs_M 80	75	80	85
Wrs_H 100	80	90	100

Fuzzy_out 68 %

OUT min 30 %

OUT max 100 %

kvs 81 %

Out 55 %

MAN 100 %

Рис. 7. Налаштування швидкості обертання лопатей основного вентилятора / Main fan rotation speed settings

На екрані налаштування швидкості обертання лопатей основного вентилятора (рис. 7) відображаються: температура в камері сушарки (TE_1), маса завантаженої сировини (WE), початкова маса завантаження сировини (Wstart), відносна маса завантаженої сировини від початку сушіння сировини (WErs), відносна маса завантаження від номінального завантаження сушарки (Wrnl), коефіцієнт завантаженості сушарки (kvs). Також на екрані задаються рівні вхідних змінних нечіткого блока (T, Wrs), таблиця правил (FUZZY rules), відображаються обчислений вихід нечіткого блока (Fuzzy_out) та підсумкове завдання швидкості обертання лопатей вентилятора (Out), обмеження вихідного сигналу (OUTmin, OUTmax) та значення швидкості обертання лопатей вентилятора в ручному режимі (MAN).

Окремим функціональним завданням комплексної системи автоматизації ТП є керування вологовидаленням із камери сушарки. У процесі сушіння сировини волога, що випаровується із неї, накопичується в сушильному агенті, внаслідок чого зменшується його здатність до подальшого поглинання вологи. Недостатнє вологовидалення з камери знижує інтенсивність процесу сушіння сировини, а надмірна робота витяжного вентилятора впливає на температурний режим у камері, збільшує енерговитрати та збільшує тривалість процесу сушіння сировини. Видалення вологого повітря з камери забезпечується витяжним вентилятором, інтенсивність роботи якого має змінюватися відповідно до вологості повітря в камері сушарки.

Для керування витяжним вентилятором доцільно використати ПІ-регулятор за абсолютною вологістю повітря в камері сушарки, оскільки підтримання заданої вологості повітря є типовою задачею регулювання, динаміка зміни вологості є досить повільною, а керівний вплив реалізується зміною швидкості обертання витяжного вентилятора, що відповідає неперервному вихідному сигналу ПІ-регулятора. У розробленій системі керування вологовидаленням здійснюється за абсолютною вологістю повітря, яка безпосередньо характеризує кількість водяної пари в одиниці об'єму повітря. Абсолютна вологість повітря розраховується за вимірними значеннями відносної вологості та температури повітря в камері сушарки. Це пов'язано з тим, що відносна вологість повітря істотно залежить від його температури, а температура в камері сушарки протягом технологічного циклу змінюється відповідно до заданої програми. За таких умов однакове значення відносної вологості повітря за різних температур відповідає різній фактичній кількості водяної пари в повітрі. Завдання абсолютної вологості повітря в камері сушарки для ПІ-регулятора витяжного вентилятора задається в технологічній програмі, паралельно із завданням температури. Якщо абсолютна вологість повітря знижується нижче від заданого значення, вихідний сигнал обмежується мінімальним значенням і вентилятор працює зі швидкістю обертання лопатей, потрібною для підтримання базового повітрообміну. Збурення температурного режиму, що виникають унаслідок роботи витяжного вентилятора та видалення нагрітого повітря з камери, компенсуються підсистемою дворежимного керування температурою.

Важливою складовою комплексної автоматизації конвективних камерних сушарок є програмне та програмно-логічне керування технологічним циклом сушіння сировини. Практична важливість цих завдань полягає в тому, що процес сушіння сировини є тривалим і складається з послідовності окремих етапів, для кожного з яких можуть задаватися різні параметри роботи сушарки. Автоматичне виконання цих етапів дає змогу зменшити навантаження на оператора, знизити вплив людського фактора, зменшити ймовірність помилок під час ведення процесу та підвищити повторюваність результатів сушіння сировини. У розробленій системі технологічна програма визначає послідовність етапів процесу, задані значення основних технологічних параметрів та умови завершення ТП сушіння сировини.

Для роботи з різною сировиною в системі реалізовано механізм технологічних рецептів. Рецепт містить набір налаштувань, необхідних для сушіння сировини конкретного виду сировини. Збереження таких налаш-

тувань дає змогу швидко переходити між різними видами сировини, зменшує потребу в ручному введенні параметрів і знижує ймовірність помилки оператора.

Окрім виконання основного технологічного режиму, програмно-логічне керування ТП забезпечує контроль умов завершення ТП сушіння сировини, реалізацію автоматичних блокувань і сигналізації. Це підвищує безпечність і надійність роботи сушарки та знижує ризик псування сировини.

Розроблена комплексна система автоматизації охоплює основні функціональні завдання автоматизації ТП сушіння сировини в конвективній камерній сушарці: керування температурою повітря в камері сушарки, циркуляцією повітря, вологовидаленням із камери сушарки та програмне керування технологічним циклом

сушіння. Практична перевірка розробленої системи автоматизації ТП підтвердила її працездатність та ефективність під час автоматичного ведення ТП сушіння сировини. Експериментальні дослідження показали зменшення загальної тривалості сушіння сировини та витрат електроенергії порівняно з використанням тільки ПД-регулювання температури та фіксованих швидкостей основного і витяжного вентиляторів (таблиця). Ступінь зменшення цих показників істотно залежить від виду сировини, завантаженості сушарки, температури повітря у приміщенні, вибраного технологічного режиму сушіння сировини та встановлених оператором фіксованих швидкостей вентиляторів за відсутності автоматичного керування ними.

Таблиця. Порівняння підходів до керування конвективною камерною сушаркою /
Comparison of control approaches for a chamber convective dryer

Умова/показник порівняння	Комплексна система автоматизації	Базовий варіант керування
Сировина для сушіння	Яблука сорту "Golden Delicious"	Яблука сорту "Golden Delicious"
Початкова маса завантаженої сировини, кг	1,122	1,168
Заданий температурний режим сушіння	Постійна температура 55 °C	Постійна температура 55 °C
Метод керування температурою	Дворежимне керування	ПД-регулювання
Метод керування основним вентилятором	Нечіткий задавач за температурою повітря в камері та відносною масою завантаження	Постійна швидкість обертання 100 %
Метод керування витяжним вентилятором	ПД-регулювання за абсолютною вологістю повітря в камері	Постійна швидкість обертання 50 %
Завершення ТП сушіння за відносною масою сировини від початкової, %	15	15
Час виходу на задане значення температури, хв	6,5	15,0
Максимальне підвищення температури, °C	0,1	1,6
Тривалість процесу сушіння, год	8,52	9,15
Спожита електроенергія на сушіння, кВт·год	2,619	3,109
Питома спожита електроенергія на сушіння, кВт·год/кг	2,334	2,661

Отриманий результат пов'язаний із комплексною автоматизацією основних функціональних завдань керування ТП. Дворежимне керування температурою повітря в камері сушарки забезпечує вищу якість відпрацювання температурного завдання: підвищилась швидкість переходу між температурними режимами, зберігається висока точність стабілізації температури та зменшується або усувається перерегулювання. Відсутність перерегулювання є особливо важливою під час роботи поблизу максимально допустимих температур, оскільки це дає змогу інтенсифікувати процес сушіння сировини без ризику перегріву сировини. Нечіткий задавач швидкості обертання лопатей основного вентилятора дає змогу задавати необхідну інтенсивність обдування сировини залежно від температурного режиму її сушіння і завантаженості сушарки. Керування вологовидаленням із камери сушарки з використанням ПД-регулятора абсолютної вологості повітря в камері знизило надлишкове видалення нагрітого повітря зі збереження нормальних умов сушіння сировини. Розроблена система також має зручний людино-машинний інтерфейс і механізм роботи з технологічними рецептами, що спрощує налаштування режимів сушіння, зменшує навантаження на оператора та підвищує зручність експлуатації установки.

Одним із перспективних напрямів удосконалення запропонованої системи керування конвективною камерною сушаркою може бути автоматичне формування наборів даних для донавання нейромереж дворежимного керування температурою повітря в камері сушар-

ки. Такий підхід до формування навчальних наборів передбачає використання даних, отриманих під час експлуатації сушарки, для подальшого донавання та уточнення параметрів нейромереж.

Обговорення результатів дослідження. Комплексна система автоматизації технологічного процесу (ТП) сушіння сировини в конвективних камерних сушарках – це багаторівнева система керування, призначена для забезпечення оптимальних температурно-вологісних режимів сушіння сировини, підвищення якості остаточного продукту, зниження енерговитрат та гарантування безпеки виробництва. Конвективне камерне сушіння є періодичним процесом, що має високу інерційність та суттєву нелінійність об'єкта керування. Сировина (дерева, цегла, харчові продукти, сільськогосподарські культури тощо) висушується шляхом обдування гарячим теплоносієм (повітрям або топочними газами).

У роботі [8] запропоновано інтелектуальну систему автоматичного керування ТП сушіння деревини в сонячній сушильній камері. Керування параметрами повітряного агента в сушарці побудовано як гібридний нечіткий регулятор, що поєднує оптимальний нечіткий регулятор, звичайний нечіткий регулятор й адаптивний нечіткий регулятор. Формування функцій належності та правил здійснюється з урахуванням вимірюваних вологості та температури повітря в камері сушарки та поза камерою. Виконавчими елементами є керований нагрівач, заслінка притоку сухого повітря та клапан зволожувача. Розглянута система автоматичного керування сушаркою показала високу якість регулювання температури

та вологості повітря в камері. Водночас, у роботі не розглянуто особливості програмного керування циклом сушіння сировини та керування сушаркою залежно від її завантаженості.

У роботі [6] розглянуто систему регулювання температури повітря в сушарці на основі інтелектуального керування з використанням штучної нейронної мережі. У системі вимірювалися температура повітря, відносна вологість повітря та масова витрата повітряного потоку. Керівна дія реалізовувалася шляхом зміни витрати повітря за допомогою вентилятора. Алгоритм керування температурою повітря було побудовано на підставі NARX-моделі сушарки та нейромережевого прогнозного регулятора. Нейромережевий регулятор, порівняно зі звичайним ПІД-регулятором, забезпечив вищу ефективність роботи за часом регулювання, перерегулюванням та стабільністю температури. У роботі не розглядалася автоматизація інших завдань керування ТП сушіння сировини, окрім регулювання температури.

У роботі [14] наведено автоматизовану систему керування сушильною камерою періодичної дії для процесу сушіння деревини. Робота є ближчою до практичної реалізації системи автоматизації ТП, оскільки розглядає апаратну платформу та програмну організацію режимів роботи. Сформовано перелік вхідних і вихідних сигналів системи керування. Описано алгоритм роботи системи керування сушильною камерою, що містить автоматичний режим й оброблення аварійних ситуацій. Регулювання температури та вологості повітря в камері здійснюється за двопозиційним законом, а циркуляційні вентилятори постійно увімкнені зі сталою продуктивністю.

У роботі [7] розглянуто модернізацію шафової сушарки на основі простої системи автоматизації ТП, призначеної для зменшення участі оператора в процесі сушіння сировини. У системі вимірювалася температура в сушильній шафі за допомогою давача температури, а тривалість процесу задавалася таймером. Регулювання температури здійснювалося за двопозиційним алгоритмом. Робота демонструє практичне зниження впливу оператора на процес та можливість досягнення необхідної вологості сировини. Водночас, у роботі не розглянуто питання розширення інформаційного забезпечення технологічного процесу висушування різної сировини, аварійних блокувань та реєстрації технологічних параметрів.

У роботі [3] досліджено сушарку картоплі, у якій реалізовано систему ПІД-регулювання температури та відносної вологості повітря в камері сушарки. У системі вимірювалися температура і відносна вологість повітря всередині сушильної камери. Маса попередньо відвареної картоплі вимірювалася на початку і наприкінці сушіння сировини для оцінювання кількості видаленої вологи. Керівні дії реалізовувалися через роботу вентиляторів, які змінювали потік сухого повітря та забезпечували видалення вологого повітря з камери, а також через увімкнення електричних нагрівачів для підтримання температури. Алгоритми керування температурою повітря було побудовано на основі ПІД-регулятора. Параметри ПІД-регуляторів визначалися за методом Зіглера-Ніколса. У роботі не розглядалися питання контролю вологості сировини під час процесу та керування процесом сушіння сировини з урахуванням завантаженості сушарки.

У роботі [5] наведено результати роботи напівавтоматичної газової камерної сушарки для сушіння риби з ПІД-регулюванням температури. У системі вимірювалася температура всередині сушарки термопарою. Маса риби та маса використаного скрапленого газу періодично вимірювалися за допомогою електронних ваг. Керівна дія реалізовувалася зміною подачі газу до газового пальника. Результати показали, що підвищення температури призводить до зменшення вологовмісту риби, але супроводжується збільшенням енергоспоживання. Робота не розглядає контроль і керування вологовидаленням із камери сушарки, керування вентилятором подачі повітря та програмне керування циклом сушіння сировини.

У роботі [9] досліджено IoT-систему конвективного сушіння сировини моркви гарячим повітрям, для якої було реалізовано інтелектуальне нейромережеве керування температурою повітря в камері сушарки. У системі вимірювалися температура повітря в сушильній камері, температура поверхні продукту, відносна вологість повітря сушильного агента, швидкість повітряного потоку та втрата маси продукту у процесі сушіння сировини. Керівна дія реалізовувалася зміною теплової потужності електричного нагрівача, тоді як вентилятор забезпечував циркуляцію гарячого повітря через сушильну камеру. Алгоритм керування температурою повітря було побудовано на основі штучної нейронної мережі типу багатошарового перцептрона, яка формувала сигнал керування потужністю електричного нагрівача. Завдяки цьому система адаптувала керівний вплив до поточного стану процесу сушіння сировини, завантаженості сушарки та інтенсивності видалення вологи, зменшуючи температурні коливання, характерні для двопозиційного алгоритму регулювання. Експериментальні результати показали кращу якість стабілізації температурного режиму та скорочення тривалості сушіння сировини порівняно з двопозиційним регулюванням.

Унаслідок обговорення результатів дослідження встановлено, що більшість робіт має переважно наукове спрямування і зосереджується на дослідженні алгоритмів, принципів або методів керування окремими завданнями ТП сушіння сировини. Майже відсутні роботи науково-практичного спрямування, у яких комплексно розглянуто автоматизацію всіх основних завдань керування ТП сушіння сировини в конвективних камерних сушарках. Це визначає доцільність розроблення комплексного підходу до автоматизації ТП сушіння сировини в конвективних камерних сушарках.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – розроблено модель комплексної системи автоматизації процесу сушіння сировини в конвективній камерній сушарці, яка поєднує програмне керування технологічним циклом сушіння, дворежимне керування температурою повітря в камері сушарки, нечітке формування завдання швидкості обертання лопатей основного вентилятора та ПІ-регулювання абсолютної вологості повітря в камері сушарки, що дає можливість здійснювати ефективне автоматичне керування ТП.

Практична значущість результатів дослідження – результати дослідження можна використати для практичної реалізації систем автоматизації конвективних камерних сушарок, що дасть змогу забезпечити автома-

тичне ведення ТП сушіння сировини за заданою програмою, зменшити вплив людського фактора та навантаження на оператора, підвищити повторюваність результатів, скоротити тривалість процесу сушіння сировини та витрати електроенергії.

Висновки / Conclusions

Розроблено комплексну систему автоматизації ТП сушіння сировини в конвективних камерних сушарках, яка поєднує підсистеми керування температурою повітря в камері сушарки, циркуляцією сушильного агента, вологовидаленням із камери сушарки та програмно-логічне керування ТП. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Запропоновано загальну структуру комплексної системи автоматизації ТП, що враховує основні функціональні завдання ТП сушіння сировини та створює основу для розроблення ефективних систем автоматичного керування конвективними камерними сушарками.
2. Для керування температурою повітря в камері сушарки запропоновано дворежимне керування ТП сушіння сировини з нейромережовим перемиканням режимів та ініціалізацією ПІД-регулятора, що забезпечує швидке та якісне відпрацювання технологічного режиму сушіння сировини.
3. Для керування швидкістю обертання лопатей основного вентилятора запропоновано використовувати нечітку логіку з урахуванням температурного режиму сушіння сировини та завантаженості сушарки, що дає змогу керувати інтенсивністю обдування сировини відповідно до поточного стану ТП її сушіння.
4. Для керування витяжним вентилятором застосовано ПІ-регулювання абсолютної вологості повітря в камері сушарки, що дає змогу зменшити надлишкове видалення нагрітого повітря з камери за збереження необхідних умов сушіння сировини.
5. Запропоновану комплексну систему автоматизації конвективних камерних сушарок реалізовано на експериментальній установці. Практична перевірка розробленої системи автоматизації ТП підтвердила її працездатність і ефективність роботи, що засвідчує доцільність використання запропонованого підходу для автоматизації конвективних камерних сушарок.

Декларація про штучний інтелект. Під час підготовки цієї роботи автори використовували сервіси ChatGPT та Grammarly для: перевірки граматики та орфографії, перефразування та переформулювання складних речень з текстовими зворотами. Після використання цих сервісів автори проаналізували та відредагували контент майбутньої статті, тобто несуть повну відповідальність за зміст публікації.

References

1. Baldeón, E. O., Salas-Valerio, W. F., Vidaurre-Ruiz, J. M., & Comettant-Rabanal, R. (2024). Convective drying kinetics of yacón (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl.) slabs and evaluation of the dryer PID temperature control system. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 40(1), 44–60. <https://doi.org/10.29393/CHJAAS40-5CDER40005>

2. Heriansyah, Istiqphara, S., & Adliani, N. (2019). Design of temperature control for herbal dryer based on PID controller by utilizing renewable energy sources. *Jurnal ECOTIPE*, 6(2), 97–101. <https://doi.org/10.33019/ecotipe.v6i2.1392>
3. Herrera-Morales, J. A., Carbajal-Morán, H., & Almidón-Elescano, Á. (2022). Solar dryer with electronic PID controller for dry potato production. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(1), 223–229. <https://doi.org/10.12912/27197050/143784>
4. Loha, C., Das, R., Choudhury, B., & Chatterjee, P. K. (2012). Evaluation of air drying characteristics of sliced ginger (*Zingiber officinale*) in a forced convective cabinet dryer and thermal conductivity measurement. *Journal of Food Processing & Technology*, 3(6), article number 130. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000160>
5. Ohijegbon, I. O., Lasode, O. A., Adebayo, S., Ajayi, O. O., & Omotosho, O. A. (2018). Data on drying kinetics of a semi-automated gas-fired fish dryer. *Data in Brief*, 18, 641–647. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.03.072>
6. Rejabov, S., Usmonov, B. S., Usmanov, K., Eshbobayev, J., & Yusupov, M. (2025). Development of a temperature regulation system for solar dryers based on artificial neural network-driven intelligent control. *Engineering Proceedings*, 117(1), article number 53. <https://doi.org/10.3390/engproc2025117053>
7. Santoso, M. T., Sudarto, G., Nusriningyati, & Patni. (2023). Modification of dryer cabinet based on automation system. In *Proceedings of the International Joint Conference on Arts and Humanities 2022 (IJCAH 2022)* (pp. 1064–1071). Atlantis Press SARL. https://doi.org/10.2991/978-2-38476-008-4_113
8. Situmorang, Z., & Situmorang, J. A. (2015). Intelligent fuzzy controller for a solar energy wood dry kiln process. In *2015 International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment (TIME-E)* (pp. 152–157). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TIME-E.2015.7389765>
9. Tabares-Martínez, J. M., Guzmán-López, A., Bravo-Sánchez, M. G., Villaseñor-Ortega, F., Martínez-Nolasco, J. J., & Barranco-Gutiérrez, A. I. (2026). Intelligent temperature control using artificial neural networks in an IoT-enabled cyber-physical hot-air drying system: Analysis of drying kinetics and thermal efficiency. *AI*, 7(5), article number 157. <https://doi.org/10.3390/ai7050157>
10. Tchaya, G. B., Tchhoffo Houdji, E., Tchami, J. H., Kapseu, C., & Kamta, M. (2021). Regulation of temperature on multitrays in an indirect solar dryer (ISD) with energy storage and three airflow modes. *Journal of Engineering*, 2021, article ID 6668095. <https://doi.org/10.1155/2021/6668095>
11. Usmanov, K. (2025). Fuzzy-logic-based intelligent control of a cabinet solar dryer for Plantago major leaves under real climatic conditions in Tashkent. *Engineering Proceedings*, 117(1), article number 35. <https://doi.org/10.3390/engproc2025117035>
12. Vázquez, J., Reyes, A., Mahn, A., & Cubillos, F. (2016). Experimental evaluation of fuzzy control solar drying with thermal energy storage system. *Drying Technology*, 34(13), 1558–1566. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1137001>
13. Yang, T., Zheng, X., Xiao, H., Shan, C., Yao, X., Li, Y., & Zhang, J. (2023). Drying temperature precision control system based on improved neural network PID controller and variable-temperature drying experiment of cantaloupe slices. *Plants*, 12(12), article ID 2257. <https://doi.org/10.3390/plants12122257>
14. Yevseienko, O. M., Olshevskiy, A. V., & Leshchenko, V. M. (2022). Automated control system for a batch drying chamber. *Technical Engineering*, 2(90), 52–58. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-52-58](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-52-58)

V. S. Melnyk, Ya. V. Smityukh

National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

COMPREHENSIVE AUTOMATION OF THE TECHNOLOGICAL DRYING PROCESS IN CHAMBER CONVECTIVE DRYERS

The article presents the results of developing an integrated automation system for a chamber convective dryer intended for automatic control of the technological process of raw material drying. The proposed system structure covers the main tasks of controlling

the air temperature in the chamber, the circulation of the drying agent, moisture removal, as well as program control of the technological process, operation with technological recipes, automatic interlocks, alarm signaling, and the human-machine interface. The technological program for raw material drying is implemented as seven sequential steps, in which the transition duration and the final values of temperature and absolute air humidity in the dryer chamber are specified. A dual-mode approach is applied for air temperature control: the intensive temperature change mode ensures rapid approach to the setpoint, while the temperature stabilization mode is implemented on the basis of a PID controller. Switching between the modes is performed using a neural network, taking into account the inertial temperature overshoot, while the initial value of the PID controller control action is formed by a neural network based on data characterizing the required heater power for maintaining the temperature in steady-state mode. The rotational speed setpoint of the main fan is determined on the basis of fuzzy logic, taking into account the temperature in the chamber, the relative mass of the dryer load from the beginning of raw material drying, and the dryer loading relative to the nominal value. The exhaust fan is controlled by a PI controller according to the absolute air humidity in the chamber, which is calculated from the measured values of relative air humidity and temperature in the chamber. The dryer control functions are implemented on a programmable controller based on Raspberry Pi 5, and the dryer control algorithms are developed in the CODESYS environment using the ST language of the IEC 61131-3 standard. The system was implemented and tested on an experimental chamber convective dryer with a multisensor measurement system, which provides measurement of air temperature and humidity in the dryer chamber, ambient air temperature, the mass of the loaded raw material, electricity consumption, and calculation of absolute air humidity in the chamber. The proposed structure of the comprehensive dryer automation system demonstrated operability and efficiency, which confirms the feasibility of its practical use for the automation of chamber convective dryers.

Keywords: chamber convective dryer; thermal drying process; multisensor measurements of the drying process; drying control algorithm; PID controller; fuzzy logic; artificial neural network.